

KMU-Innovativ Verbundvorhaben Produktionsforschung:

HyLight3D

Schlussbericht

„Prozesskette zur variantenflexiblen Herstellung hybrider Leichtbaustrukturen durch Einsatz umformender, additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren (HyLight3D)“

Kooperationspartner 1:	robot-machining GmbH (rm) Am Sandborn 6-10, 63500 Seligenstadt
Kooperationspartner 2:	3D-Schilling Prototypen GmbH (3DS) Mühlenweg 8, 99706 Sonderhausen
Kooperationspartner 3:	Robotized rm Systems GmbH (robotized) O'Brien-Straße 2, 91126 Schwabach
Kooperationspartner 4:	TU Braunschweig Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig
Förderkennzeichen:	02P17K610 (rm) 02P17K611 (3DS) 02P17K612 (robotized) 02P17K613 (IWF)
Berichtszeitraum:	01.01.2019 – 31.12.2020

Förderhinweis:

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



„Prozesskette zur variantenflexiblen Herstellung hybrider Leichtbaustrukturen durch Einsatz umformender, additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren“

(HyLight3D)

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, Martin David, Marcel Droß, Max Albergt	(IWF)
Alfred Kaser, Fredi Rechmann, Thomas-Martin Haitzchi	(rm)
Dr.-Ing. Martin Schilling, Dr.-Ing. Thomas Schilling	(3DS)
Norbert Krach, Thomas Rex	(robotized)

Kurzfassung:

Die steigende Nachfrage nach individuell gefertigten Produkten führt zu einer wachsenden Variantenvielfalt und damit einhergehend zu einer Verringerung der zu fertigenden Losgrößen. Insbesondere die Produktion von Multi-Material-Bauteilen stellt die Industrie vor Herausforderungen, aufgrund der belastbaren Verbindung zwischen artfremden Materialien sowie die zugleich kostengünstige und variantenflexible Fertigung von kleinen Losgrößen. Das Ziel des Verbundprojektes ist daher die Umsetzung und exemplarische Validierung einer industriell skalierbaren, robotergestützten Prozesskette zur Herstellung von Metall-Kunststoff-Bauteilen. Für die Erreichung des Ziels wurden innerhalb des Projektes verschiedene Roboterendeffektoren und entsprechende Bahnplanungsansätze entwickelt. Darüber hinaus standen die Prozessentwicklung der roboterbasierten Fertigung und die experimentelle Erprobung der entwickelten Prozesse im Vordergrund.

Auf Basis der Endeffektoren für die metallseitige Oberflächenstrukturierung und dem endkonturnahen Kunststoff-3D-Druck konnte gezeigt werden, dass die in Aluminium eingebrachten Oberflächenstrukturen eine zuverlässige Verbindung zwischen Metall und Kunststoff ermöglichen. Für den innerhalb der Prozesskette anschließenden Fräsprozess wurde eine adaptive Spanerfassung entwickelt, welche die Späne prozessnah erfasst und einen Spanerfassungsgrad von bis zu 95% erreicht. Der Fräsprozess wird dabei über die Erfassung der Spindelleistung geregelt, sodass verschiedene Materialien mit zugehörigen Parametern (Vorschub, Spindeldrehzahl) bearbeitet werden können.

Für die exemplarische Validierung der Prozesskette wurde anhand eines Erlanger Trägers (einer weitverbreiteten Testgeometrie aus dem Bereich der Automobilindustrie) ein Demonstrator gefertigt sowie eine Machbarkeitsstudie an einem Rahmen einer Kniegelenksprothese (Ottobock) begonnen. Hierzu sind Aluminiumgrundkörper erarbeitet worden, auf welchen automatisiert Strukturen zur Verklammerung des aufgedruckten Kunststoffs aufgebracht werden konnten. Abschließend wurde das Metall-Kunststoff-Bauteil spanend in seiner Endkontur definiert.

Es ist davon auszugehen, dass die industrielle Anwendung der im Forschungsprojekt untersuchten skalierbaren, robotergestützten Prozesskette die Produktion von individuell gefertigten Bauteilen in kleinen und mittleren Stückzahlen nachhaltig verändern wird.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
1 Motivation und Zielsetzung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Anlass für das Forschungsvorhaben	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Fügetechniken für Metall-Kunststoff-Verbindungen	3
2.2 Additive Fertigung von Metall-Kunststoff-Bauteilen	4
2.3 Zerspanung von Multi-Material-Bauteilen	4
2.4 Absaugtechnik	5
2.5 Patentlage	6
3 Forschungsziel und Lösungsweg	8
4 Ergebnisdarstellung	9
4.1 Verwendete Anlageninfrastruktur	9
4.2 Robotergestützte Oberflächenstrukturierung zur Fertigung hybrider Bauteile	10
4.2.1 Endeffektor zur Strukturierung von Metalloberflächen	10
4.2.2 Prozessfenster zur wiederholgenauen Strukturierung	17
4.2.3 CAD-CAM Schnittstelle zur Oberflächenstrukturierung	23
4.3 Charakterisierung des additiven Kunststoffauftrags auf Oberflächenstrukturen	28
4.3.1 Vorheiz- und Anpresskonzepte für den additiven Andruckprozess	28
4.3.2 Modifizierung und Weiterentwicklung der Extrudertechnik	34
4.3.3 Prozesslandkarte für den Kunststoffauftrag auf Verklammerungsstrukturen	38
4.4 In-Prozess Spannerfassung und Prozessregelung	47
4.4.1 In-Prozess Spannerfassung	47
4.4.2 Werkstoffadaptive Prozessregelung	54
4.5 Anlagenkonzepte für die entwickelte Prozesskette	71
4.6 Anwendung der Prozesskette auf Demonstratorbauteile	74
5 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der erzielten Forschungsergebnisse	82
5.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU	82
5.2 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	83
5.3 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	83
6 Literaturverzeichnis	85
7 Veröffentlichungen	87
8 Anhang	88
8.1 Anforderungsanalysen	88
8.2 Ergebnisse der Strukturierung von AlMg3	90
8.3 Ergebnisse der Strukturierung von DC 01	91
8.4 Darstellung der Prozessreglung in Labview	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Wirtschaftlichkeit von etablierten Produktionsansätzen für Multi-Material-Bauteile	2
Abbildung 2-1: Adaptives Absaugsystem ADExSys	5
Abbildung 3-1: Angestrebte flexible und skalierbare Prozesskette	8
Abbildung 4-1: Schematischer Aufbau des IML	9
Abbildung 4-2: Roboterendeffektor zur mechanischen Oberflächenstrukturierung	12
Abbildung 4-3: Fully automated Structuring Tool – FauST	13
Abbildung 4-4: Versuchsaufbau für Rückstoßuntersuchung	14
Abbildung 4-5: Ausgewählter Verlauf für Kräfte in y-Richtung für eine einzelne Strukturierung	14
Abbildung 4-6: Hebelarme für die Berechnung auftretender Reaktionsmomente	15
Abbildung 4-7: Versuchsaufbau zur Messung der Reaktionskräfte und –Momente	16
Abbildung 4-8: Aufgespannter Raum für max. Reaktionsmomente bei Endeffektor-Orientierungen ...	17
Abbildung 4-9: Versuchsprobe mit neun Verklammerungsstrukturen	17
Abbildung 4-10: Gesägte Versuchsprobe für mikroskopische Vermessung	17
Abbildung 4-11: Strukturhöhen S_H für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung	19
Abbildung 4-12: Strukturbreiten S_B für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung ...	19
Abbildung 4-13: Strukturtiefen S_T für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung	19
Abbildung 4-14: Eindringtiefen S_{ET} für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung ...	19
Abbildung 4-15: Aspektverhältnis S_H / S_B bei unterschiedlicher Federvorspannung	20
Abbildung 4-16: Projizierte Flächen A_{PX} und A_{PZ} bei unterschiedlicher Federvorspannung	20
Abbildung 4-17: Entwicklung der geometrischen Ausprägung der Verklammerungsstrukturen	20
Abbildung 4-18: Herstellung der Scherzugproben im extruderbasierten 3D-Druck	21
Abbildung 4-19: Scherzugkräfte von Einzelstrukturen bei unterschiedliche Federvorspannung	21
Abbildung 4-20: Bruchbild einer Scherzugprobe	22
Abbildung 4-21: Scherzugspannungen von Einzelstrukturen bezogen auf ihre projizierten Flächen ..	22
Abbildung 4-22: Strategie „Mehrachsen – Parallel“	24
Abbildung 4-23: Strategie „Mehrachsen – Entlang Kurve“	24
Abbildung 4-24: Einstellen des Winkels in Relation zur Flächennormalen	25
Abbildung 4-25: Einstellen des gleichbleibenden Abstands der Bahnen zueinander	26
Abbildung 4-26: Vergleich der beiden Methoden zur Bestimmung der Punkte auf der Oberfläche	27
Abbildung 4-27: Bewertung der Haftung additiver Strukturen auf verschiedenen Untergründen	29
Abbildung 4-28: Druckform der Prüfkörper	30
Abbildung 4-29: Verbundfestigkeit der Proben beim additiven Andruck	30
Abbildung 4-30: Konzept eines Infrarotstrahlers am Extruder	31
Abbildung 4-31: Anpressentechniken der abgelegten Kunststoffraupen	33
Abbildung 4-32: Zugfestigkeiten der unterschiedlichen nachgelagerten Anpresskonzepte	34
Abbildung 4-33: Bruchkante einer Probe Nadelrolle	34
Abbildung 4-34: Modifizierter Extruder mit Nadelverschlussdüse	35
Abbildung 4-35: Versuchsaufbau zum Einsatz von Heißeitern	37
Abbildung 4-36: Modell zur Bestimmung der zu untersuchenden Parameter beim 3D-Druck	38
Abbildung 4-37: Zusammenhang zwischen Schneckendrehzahl und Fördermenge des Extruders	39
Abbildung 4-38: Bahnplanung für die Versuchsdurchführung	39

Abbildung 4-39: Abhängigkeit der Bahnschnittfläche von Düsenabstand und norm. Motordrehzahl...	40
Abbildung 4-40: Nichtlinearitäten in der Raupenfläche bei gleichbleibender norm. Motordrehzahl	40
Abbildung 4-41: Einfluss der normierten Motordrehzahl	42
Abbildung 4-42: Unterschiede der Kunststoffraupenform	43
Abbildung 4-43: Überlappung von rechteckigen Bahnen	43
Abbildung 4-44: Querschliffe der untersuchten Druckrichtungen	44
Abbildung 4-45: Füllgrad der Struktur	45
Abbildung 4-46: Auszug aus dem morphologischen Kasten für die Absaughaube	47
Abbildung 4-47: Finale Konstruktion der Absaughaube	48
Abbildung 4-48: Am Roboter aufgebaute Absaughaube	50
Abbildung 4-49: Integrierte Absaugung der Fa. robot-machining	50
Abbildung 4-50: Ergebnisse zur Ermittlung des Spanerfassungsgrads	52
Abbildung 4-51: Vergleich der Zerspanung	53
Abbildung 4-53: Kollisionsüberwachung auf Basis der Brute-Force-Methode	54
Abbildung 4-53: Versuchsaufbau für die Fräsversuche	55
Abbildung 4-54: Messaufbau Rauheitsmessungen	55
Abbildung 4-55: Rauheitsmessungen für Aluminium bei Variation der Schnittgeschwindigkeit	56
Abbildung 4-56: Rauheitsmessungen für Aluminium bei Variation des Vorschubs	57
Abbildung 4-57: Ergebnisse Vollnutfräsen mit $a_p = 7$ bis 12 mm	58
Abbildung 4-58: Ergebnisse Rauheitsmessungen in Aluminium bei Variation des Vorschubs	59
Abbildung 4-59: Spananhaftungen beim Fräsen von ABS	59
Abbildung 4-60: Ergebnisse Kraft-, Geschwindigkeit- und Positionsmessung am ABS	60
Abbildung 4-61: Ergebnisse Rauheitsmessungen im ABS bei Variation des Vorschubs	61
Abbildung 4-62: Messergebnis Position und Geschwindigkeitsmessung ABS	61
Abbildung 4-63: Ergebnisse Vollnut ABS	62
Abbildung 4-64: Ergebnisse Schruppen/Besäumen des Hybridwerkstoffs	64
Abbildung 4-65: Vollnut Hybridwerkstoff	66
Abbildung 4-66: Abdrängung am Werkstück	67
Abbildung 4-67: Versuchsaufbau zu Bestimmung der statischen Robotersteifigkeit	67
Abbildung 4-68: Statische Steifigkeit des Roboters	68
Abbildung 4-69: Regeldiagramm	69
Abbildung 4-70: Prozessregelung am IML	70
Abbildung 4-72: Ansicht der Anlage von oben inkl. Detailansichten	72
Abbildung 4-73: Aufbau einer Anlage mit kollaborierenden Robotern	73
Abbildung 4-73: Versuchsvorbereitungen	74
Abbildung 4-74: Flexible Prozesskette angewendet auf Erlanger Träger Teilabschnitt	76
Abbildung 4-75: Kniegelenksprothese C-Leg der Fa. Ottobock	77
Abbildung 4-76: Rahmenkonzepte für die Prothesenfertigung	78
Abbildung 4-77: Spannvorrichtung für die Oberflächenstrukturierung und Zerspanung	79
Abbildung 4-78: Spannvorrichtung für den Kunststoffauftrag	79
Abbildung 4-79: Strukturierte Oberfläche des Metallrahmens	80
Abbildung 8-1: Gemessene Lastmomente $ M_x $ für Strukturierungen in AlMg3	90
Abbildung 8-2: Gemessene Lastmomente $ M_y $ für Strukturierungen in AlMg3	90

Abbildung 8-3: Gemessene Lastmomente $ M_z $ für Strukturierungen in AlMg3.....	91
Abbildung 8-4: Gemessene Lastmomente $ M_x $ für Strukturierungen in DC 01.....	91
Abbildung 8-5: Gemessene Lastmomente $ M_y $ für Strukturierungen in DC 01.....	92
Abbildung 8-6: Gemessene Lastmomente $ M_z $ für Strukturierungen in DC 01.....	92
Abbildung 8-7: Regelungsprogramm in LabView (Auszug)	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Morphologischer Kasten für strukturierenden Roboterendeffektor	10
Tabelle 4-2: Versuchsparameter zur Rückstoßuntersuchung	13
Tabelle 4-3: Reaktionskräfte für DC-01 und AlMg3 im Strukturierungsprozess	14
Tabelle 4-4: Vergleich auftretender Momente mit zulässigen Lastmomenten des Roboters	15
Tabelle 4-5: Versuchsparameter für die Prozessfensteruntersuchung	18
Tabelle 4-6: Nomenklatur zur Beschreibung der Verklammerungsstrukturen	18
Tabelle 4-7: Technische Daten des Extrudersystems	36
Tabelle 4-8: Parameter zur Eingrenzung des Parameterraums "Schichthöhe und Raupenbreite"	39
Tabelle 4-9: Parameter zur Optimierung der Verbundhaftung	44
Tabelle 4-10: Prozessparameter für den extruderbasierten Kunststoffauftrag	46
Tabelle 4-11: Gemittelte Rautiefe Rz und Formabweichungen Schrappen	63
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Ergebnisse in Bezug auf benannte Teilziele	84
Tabelle 8-1: Anforderungsanalyse zum oberflächenstrukturierenden Roboterendeffektor	88
Tabelle 8-2: Anforderungsliste zur Absaughaube mit in-Prozess Spannerfassung	89

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation

Aktuell erzeugt der Trend zu individuellen Produkten bei Großserienherstellern eine Diskrepanz zwischen umfangreicher Variantenvielfalt und hinreichender Losgröße, da etablierte, stückzahlfähige Produktionstechniken an Rentabilität verlieren. Die sogenannte „Mass Customization“ (kundenindividuelle Massenproduktion) stellt ein Produktionskonzept dar, welches in vielen Bereichen zu vielversprechenden Neugründungen und steigendem Wachstum von Unternehmen führt, da Vorteile wie Skaleneffekte, Erfahrungskurvenvorteil und Automatisierung mit dem wachsenden Wunsch des Kunden nach Individualisierung kombiniert werden. Während sich die Mass Customization für verschiedene Produkte der Sport-, Unterhaltungs- und Bekleidungsindustrie (z. B. Sportschuhe und T-Shirts), durch Verwendung aktueller Technologien, bereits rentabel umsetzen lässt, kommt es im Bereich des Multi-Material-Designs infolge des vorherrschenden Leichtbautrends zu einem spürbaren Rentabilitätsverlust in der individualisierten Bauteilproduktion.

Die typischen Vertreter solcher Multi-Material-Bauteile sind Verbunde aus Metall, Kunststoff und Fasern, da diese sich durch ein hohes Potenzial für Leichtbauanwendungen sowie für die Funktionsintegration auszeichnen. So werden bei der Herstellung von Prothesen eine Vielzahl von Komponenten verschiedener Materialien verbaut und miteinander verbunden. Dies geschieht entweder in aufwändigen manuellen Prozessen als Einzelstücke oder aber in formgebundenen Verfahren durch Verwendung von kostenintensiven Formwerkzeugen als Massenprodukt.

Da von einer weiter ansteigenden Produktion der sogenannten Hybrid-Bauteile auszugehen ist, gilt es die entstehende Technologielücke im Bereich der mittleren Stückzahlen durch innovative Fertigungstechnologien und Anlagenkonzepte zu erschließen.

1.2 Anlass für das Forschungsvorhaben

Anhand von Abbildung 1-1 wird eine Technologielücke (grüngefärbte Fläche) im Bereich der kleinen bis mittleren Stückzahlen visualisiert. Das Konsortium strebt an, diese Technologielücke mit dem kombinierten Einsatz umformender, additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren anhand einer Kniegelenksrahmenstruktur aus dem Bereich der Prothetik sowie am Beispiel eines Erlanger Trägers aus der Automobilindustrie zu erschließen. Der Kniegelenksrahmen präsentiert den Bereich der Kleinserienproduktion wohingegen die Mittelkonsole im Bereich mittlerer Stückzahlen angesiedelt ist.

Die Erschließung einer variantenflexiblen Produktion von Bauteilen im Metall-Kunststoff-Verbund ist am ehesten in solchen variantenreichen Bauteilportfolios möglich, bei denen die Bildung von Variantenfamilien geometrisch verwandter Bauteile gelingt und damit die Nutzung von gemeinsamen Halbzeugen Skaleneffekte zur Amortisierung erzeugt. Ein derartiger familienbildender Produktionsansatz mit späterer Variantenspezialisierung erfordert folglich die Finalisierung der in beispielsweise formgebenden Fertigungsschritten hergestellten Bauteilhalbzeugen zu dem angestrebten Bauteilderivat. Für diesen Finalisierungsschritt wird das Ziel verfolgt, umformende und additive robotergeführte Fertigungsverfahren in Kombination mit einer subtraktiven spanenden Nachbearbeitung zu verwenden.

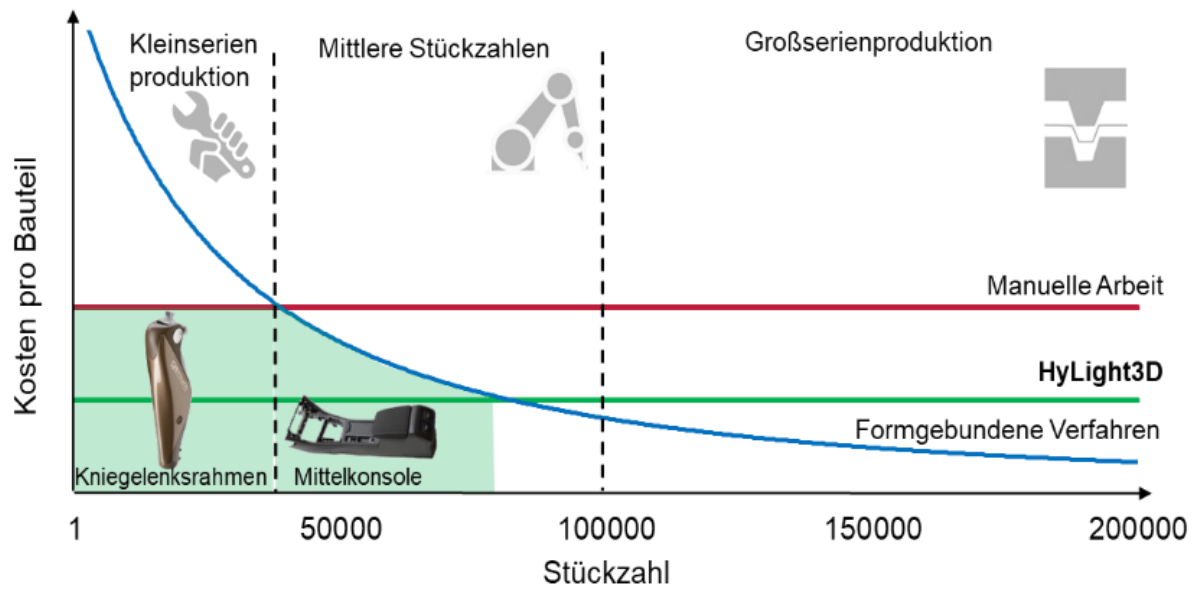


Abbildung 1-1: Wirtschaftlichkeit von etablierten Produktionsansätzen für Multi-Material-Bauteile und Handlungsbedarf für kleine und mittlere Stückzahlsszenarien in Anlehnung an [ELE10]

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Aktuell werden Metall-Kunststoff-Bauteile entweder im Bereich von kleinen Stückzahlen manuell oder bei mittleren Stückzahlen automatisiert in formgebundenen Verfahren gefertigt. Zu den manuellen Verfahren zählen das Handlaminieren und Autoklav-Prozesse [Nei14]. Dem gegenüber stehen die formgebundenen Verfahren Spritzguss oder Prägen [Nes13]. Die formgebundenen Verfahren sind durch die hohen allerdings notwendigen produktspezifischen Investitionen nur für große Stückzahlen wirtschaftlich nutzbar, wohingegen die manuellen Verfahren keine wirtschaftliche Stückzahlfähigkeit erreichen. Die beiden genannten Verfahren versuchen den Verbund zwischen Metall und Kunststoff innerhalb eines Arbeitsvorganges zu erzielen. Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Metall-Kunststoff-Bauteilen bietet das nachgelagerte Fügen der beiden Komponenten. Bei diesem Verfahren haben sich vor allem das Kleben [Bla16], [Hig00] und das Nieten [Fil17] etabliert. Das Leistungspotenzial von Metall-Kunststoff-Bauteilen, ob nun in einem Schritt oder in einem nachgelagerten Schritt gefertigt, der ökonomischen sowie ökologischen Ansprüchen genügt, wird maßgeblich durch die Verbindungsfestigkeit an den Grenzflächen der einzelnen Materialkomponenten beeinflusst. Aktuell bekannte Verfahren bieten entweder einen geringen Automatisierungsgrad oder weisen hohe Investitionskosten für benötigte Werkzeuge bei einer geringen Flexibilität der Produktion auf. Die Lücke zwischen der manuellen Fertigung mit einer hohen Flexibilität und der formgebundenen Fertigung, die vor allem für mittlere Stückzahlsszenarien nicht wirtschaftlich ist, wird um einen neuen Produktionsansatz im Rahmen dieses Verbundprojektes ergänzt. Der Produktionsansatz ist dabei sowohl für kleine als auch für mittlere Stückzahlsszenarien einsetzbar.

Nachfolgend werden der Stand der Technik und Wissenschaft sowie aktuelle Innovationen in den Bereichen der Oberflächenstrukturierung, der additiven Fertigung und der Zerspanung von Multi-Material-Bauteilen für die angestrebte Prozesskette dargestellt.

2.1 Fügeverfahren für Metall-Kunststoff-Verbindungen

Die vermehrte Anzahl aktueller Forschungsarbeiten im Bereich der Metall-Kunststoff-Bauteile hat ihren Schwerpunkt insbesondere in den Technologien zur Steigerung der Verbundfestigkeit. Die üblicherweise eingesetzten Fügeverfahren basieren dabei auf mechanischen und stoffschlüssigen Fügeverfahren. Die gewählten Ansätze sind in der Regel jedoch mit einigen Nachteilen, wie langen Verarbeitungszeiten, ungewollter Werkstoffkomponententrennung sowie der Anfälligkeit für Ermüdungseffekte durch Umwelteinflüsse verbunden [Fin10, Wah11].

Die Verbesserung der Verbundfestigkeit wird in aktuellen Forschungsarbeiten meist durch verschiedentlich erzeugte Verklammerungsstrukturen hervorgerufen. Die mechanische Verklammerung ermöglicht dabei durch die Erzeugung einer strukturierten Oberfläche eine formschlüssige Verbindung der metallischen Materialkomponente mit der im Verbund durchdrungenen Kunststoffkomponente. So zum Beispiel durch im Auftragsschweißen erzeugte Pin-Strukturen [Gra10, Rau09], mittels im Stanzstoß-Prozess eingebrachte Verklammerungsstrukturen [Bra16, Drö16, Drö17c] oder durch Laserstrahlen eingebrachte Mikrostrukturierungen [Roe11]. Darüber hinaus betrachten aktuelle Forschungen das Reibpunktfügen [Fil11, Yus15] sowie das Rührreißschweißen als mögliche alternative Fügeverfahren [Liu14].

Die Vielzahl der vorhandenen Technologien zur Steigerung der Verbundfestigkeit zwischen Metall und Kunststoff zeigen den Bedarf, eine geeignete Füge-technik für den Einsatz in einer roboterbasierten Fertigungszelle und zur Umsetzung der angestrebten Prozessroute nutzbar zu machen. Insbesondere Füge-techniken mit auf der Metalloberfläche aufgetragenen Metallstrukturen rücken dabei zunehmend in den Fokus.

2.2 Additive Fertigung von Metall-Kunststoff-Bauteilen

Neben den industriell eingesetzten Fertigungsverfahren zur Produktion von Metall-Kunststoff-Bauteilen werden auch erste Ansätze untersucht, bei denen additive Verfahren zur Herstellung dieser Bauteile zum Einsatz kommen. Eine Möglichkeit, additiv gefertigte, metallische Bauteile mit Komponenten aus einem duroplastischem faserverstärkten Kunststoffverbund (FKV) zu verbinden, bietet die Autoklav-technik. Bei dieser werden alle Komponenten an ihre zuvor bestimmte Position gebracht und anschließend im Autoklav innerhalb eines Vakuumaufbaus unter exakt definierten Temperatur- und Druckverläufen konsolidiert [Tür16]. Hierbei findet noch kein direktes Aufbringen von additiven Strukturen statt.

Eine weitere Möglichkeit, additiv gefertigte Kunststoffstrukturen mit Metall zu verbinden, bietet die chemische Metallisierung, bei welcher eine Metallschicht auf den Kunststoff aufgebracht wird [Kyo16]. Weitere Ansätze beschäftigen sich damit metallische Einleger mit einer roboterbasierten Anlagentechnik additiv mit Kunststoff zu umhüllen [Lam17]. Hierbei wird ein Extrudersystem zur Verarbeitung von Thermoplasten genutzt. Außerdem wird zur Steigerung der Verbundhaftung zwischen Metall und Kunststoff meist Haftvermittler eingesetzt [Hei20].

Zur Steigerung des Kunststoffauftrags gab es dem Gebiet der Extrudertechnik in den letzten Jahren zahlreiche Veröffentlichungen, die neue Granulat-Extruder vorstellen oder diese in Anlagen integrieren. Ein Beispiel stellt hier „YIZUMI Germany“ oder die niederländische Firma „Xtrution“ dar, welche Schneckenextruder mit Auftragsleitungen von mehreren Kilogramm Material pro Stunde ermöglichen. Je nach Anlage werden dabei meist Roboter zur Steigerung der Flexibilität und Bewegungsfreiheit eingesetzt [YIZ21, Xtr18].

Eine weitere Möglichkeit Kunststoff und Metall mittels additiver Fertigung zu verbinden, bietet ein Ansatz bei dem die Verfahren „Selective Laser Melting“ (SLM) und „Selective Laser Sintering“ (SLS) zur Kombination der beiden Werkstoffe eingesetzt werden. Zunächst wird dabei ein Metallgrundkörper mittels SLM hergestellt. Dieser wird im Anschluss mit dem SLS-Verfahren umgedruckt, um die finale Geometrie zu erzeugen [Sil16].

2.3 Zerspanung von Multi-Material-Bauteilen

Roboter werden gegenwärtig in erste Linie für die Handhabung von Bauteilen oder für Positionieraufgaben eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität und geringen Investitionskosten werden sie zunehmend auch für Fertigungsprozesse eingesetzt. Kritisch ist jedoch die geringere Steifigkeit von Robotern im Vergleich zu Bearbeitungszentren [Pan06; Che18]. Dies kann zu einem instabilen Prozess führen, der stark von der Einstellung der Roboterachsen sowie den auftretenden Zerspankräften abhängt [Che18a; Aya20]. Dies stellt insbesondere bei der Bearbeitung von Multimaterialbauteilen mit Robotern eine große Herausforderung dar. Fertigungsprobleme ergeben sich aus den stark unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften von thermoplastischen bzw. duroplastischen Kunststoffen und Metallen. Aufgrund ihrer Festigkeiten und Bruchdehnung, aber auch in Bezug auf die Schmelztemperatur und Wärmeleitfähigkeit, können die Werkstoffe nicht mit den gleichen Prozesseinstellwerten zerspannt werden.

So wird beispielsweise bei der Bearbeitung von Kunststoff im Vergleich zu Metallen eine sehr viel höhere Spandicke angestrebt, um die Bearbeitungszeit zu verkürzen. Die gleichzeitige Zerspanung von Kunststoff-Metall-Verbunden muss also an sich unvereinbare Zielsetzungen berücksichtigen, um Qualität und Produktivität auf konkurrenzfähigem Niveau zu erreichen.

Die aktuelle Forschung zielt daher hauptsächlich auf die Analyse des Bearbeitungsprozesses und die Optimierung der Genauigkeit des Roboters ab [Mej16; Lej17]. Dabei liegt der besondere Fokus auf der vorrangig auf der Bahnplanung, um den Roboter in die bestmögliche Pose zu bringen und die Bahnabweichungen zu kompensieren [Jan20; Sla20].

2.4 Absaugtechnik

Das zweite in der Zerspanung von Metall-Kunststoff-Verbunden adressierte Themengebiet ist die Erfassung von Spänen und Stäuben durch Absaugtechnik, da dies für die Einhaltung der MAK-Werte (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) unerlässlich ist. Insbesondere die bei der Absaugung entstehenden hohen Betriebskosten haben bereits Forschungsarbeiten für eine effizientere Spanerfassung motiviert [Dre07, Ble04, Geb17, Sch18].

Generell wird zwischen einer Direktabsaugung am Werkzeug und einer Raumabsaugung in der Maschine unterschieden. Die Raumabsaugung ist durch hohe Luftvolumen bei geringen Druckunterschieden gekennzeichnet und dient der Erfassung von schwebenden Staubpartikeln. Die wirkungsvolle Erfassung der Späne ist daher nur mit der Direktabsaugung möglich, wofür ein möglichst geringer Abstand zum Werkzeug benötigt wird. Der geringe Abstand zur Spanentstehung geht mit Einschränkungen hinsichtlich der geometrischen Komplexität der Bauteile einher. Für flächige Bauteile und die Drei-Achs-Bearbeitung von Plattenmaterial stehen industrielle Lösungen für Absaughauben zur Verfügung. Für eine höhere Flexibilität ist ein adaptives Absaugsystem entwickelt worden, dass auf der Basis einer sensorischen Erfassung der Partikelströmung den Absaugstutzen nachführt (Abbildung 2-1) [Geb15, Geb17]. Hierbei wird die Absaugöffnung während des Fräsprozesses durch die Drehachse nach dem Partikelstrom ausgerichtet. Das System basiert dabei auf einer CCD Kamera für die Detektion des Partikelstroms und einer nachfolgenden Datenverarbeitung, anhand derer der Antriebsmotor gesteuert werden kann. Diese unabhängige Steuerung ermöglicht die Nachrüstung von Werkzeugmaschinen mit einer Direktabsaugung. Das gezeigte System ist insbesondere für den Randbeschnitt von Plattenware entwickelt worden, sodass die Anwendung dieses Prinzips auf die Bearbeitung von Bauteilen mit hoher geometrischen Komplexität, insbesondere bei konvexen und konkaven Freiformflächen, sehr aufwendig ist.

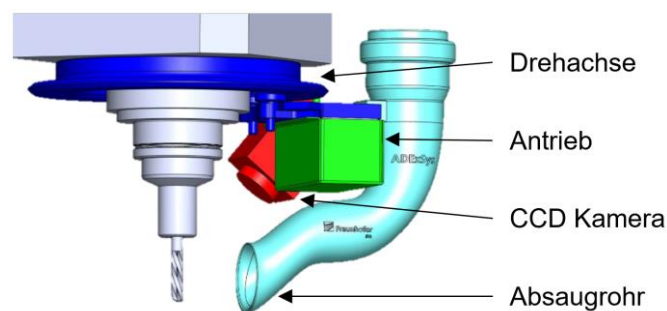


Abbildung 2-1: Adaptives Absaugsystem ADExSys zur energieeffizienten Erfassung von Stäuben und Spänen [Geb17]

Zur Erfassung der beim Bohren und Fräsen anfallenden Späne und Stäube wurde im Rahmen von Forschungsarbeiten eine Absaughaube entwickelt. Dabei wird Spülluft bei der Zerspanung durch das Werkzeug geleitet. Diese bewirkt, dass die Späne aus der Bohrung heraustransportiert und unmittelbar von der Absaughaube erfasst werden. Das System wurde für den Anwendungsfall des Orbitalbohrens von Hybridwerkstoffen aus CFK und Titan entwickelt. Damit alle Späne und Stäube erfasst werden können ist es notwendig, dass die Absaughaube nur einen geringen Abstand zur Werkstückoberfläche aufweist [Liu19].

2.5 Patentlage

Im Rahmen der Offenlegungsschrift **WO 2000049308 A1** wird ein Verfahren beschrieben, mit welchem Rückenplatten für einen Bremsbelag oberflächlich strukturiert werden können, um so die Reibung zwischen Metallplatte und Bremsbelag stark zu vergrößern. Die Oberflächenstrukturen werden dabei durch ein Werkzeug erzeugt, welches aus einer Vielzahl kleiner Schneiden besteht. Die Schneiden selbst sind modular in Reihe zu sägeähnlichen Blättern kombiniert, wobei mehrere Schneidenblätter in gegenläufiger Richtung parallel in das Gesamtwerkzeug integriert werden. Durch eine relative Bewegung von Werkstück und Werkzeug zu einander dringen die Schneiden in die Metalloberfläche ein und heben so Pin-ähnliche Späne heraus. Diese weisen im Vergleich zu HyTensile-Strukturen (eigene Vorarbeit) eine schmale und orthogonal zur Metalloberfläche stehende Geometrie auf. Aufgrund dieser Geometrie ist von einer geringen Haftzugfestigkeit bei senkrechter Zugbelastung auszugehen. [Arb00]

Die Offenlegungsschriften **WO 2017093261 A1** als auch **WO 2014193961 A1** beschäftigen sich mit der Herstellung eines Interieur-Bauteils im Fahrzeug durch den Einsatz eines Grundkörpers, an welchen mittels additiver Fertigung verschiedene Bauteil-Features angedruckt werden. Verglichen mit dem angestrebten Verbundprojekt wird ebenfalls ein Grundkörper als Basis für die Ausbildung der Varianten genutzt, nur handelt es sich dabei nicht um einen metallischen Grundkörper. Im Rahmen des Verbundprojektes wird neben dem Andruckprozess auch die notwendige Oberflächenstrukturierung und der Nachbearbeitungsschritt betrachtet. [Cat14, Dra17]

Eine weitere Offenlegungsschrift **DE 102013217825 A1** betrachtet sowohl die Oberflächenstrukturierung als auch den Andruck an metallische Halbzeuge. Bei diesem Ansatz wird eine laserbasierte Oberflächenstrukturierung verwendet, die verglichen mit einer rein mechanischen Strukturierung mit zusätzlichen Schutzmechanismen verbunden ist. Ein weiterer Unterschied zum angestrebten Verbundprojekt stellt die eingesetzte Drucktechnologie dar. In der Offenlegungsschrift kommt ein Filament basiertes Verfahren (FDM) zum Einsatz, wohingegen im Verbundprojekt ein Granulatextruder mit höheren auftragsraten genutzt wird. [Hoe15]

In der Offenlegungsschrift **DE 102012023328 B3** wird eine Absaugvorrichtung sowie ein Verfahren zum Ansaugen eines Partikelstromes beschrieben. Diese Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass ein Absaugkopf seitlich neben dem Werkzeug mit der Ansaugöffnung dem Partikelstrom zugewandt angeordnet wird (Abbildung 2-1). Diese Anordnung ist durch eine Drehachse konzentrisch zur Spindelachse und einer Antriebseinheit gekennzeichnet. Die Ansteuerung ist auf der Grundlage von Sensorsignalen und einer Auswerte- und Steuereinheit unabhängig der Werkzeugmaschine realisiert. Die Absaugvorrichtung wird als modulare nachrüstbare Einheit beschrieben, die autonom zur Werkzeugmaschine arbeitet und nicht in das Gesamtsystem der Fertigungseinrichtung eingebunden ist. [Sch14]

Eine weitere Absaugvorrichtung aus dem Bearbeitungsbereich für Werkzeugmaschinen wird durch die Offenlegungsschrift **DE 102013020820 A1** dargestellt. Hierbei ist die Erfindung durch die Kombination aus einem Zuführkanal von Luft und einem Absaugkanal von Spänen gekennzeichnet. Der Aufbau der Erfindung, die die Absaugung von Spänen und Stäuben aus dem Bearbeitungsbereich vorsieht, beinhaltet die Kopplung von Zuführ- und Absaugkanal miteinander, sodass ein Teil der abgesaugten Luft über die Zuführung zurück in den Bearbeitungsbereich geleitet werden kann. Mit der zugeführten Luft wird der Absaugvorgang der Späne und Stäube dahingehend unterstützt, dass Energie eingespart und eine bessere Erfassung erreicht wird. [Geb15]

3 Forschungsziel und Lösungsweg

Das übergeordnete Ziel des Verbundprojektes war die technologische Entwicklung einer skalierbaren Prozesskette für Metall-Kunststoff-Bauteile sowie ein hierfür exemplarisches Maschinenkonzept, bei dem metallische Halbzeuge vorgefertigt und ihre Oberflächen strukturiert, dann durch additive Verfahren um Kunststoff strukturell ergänzt und subtraktiv finalisiert werden, vgl. Abbildung 3-1.

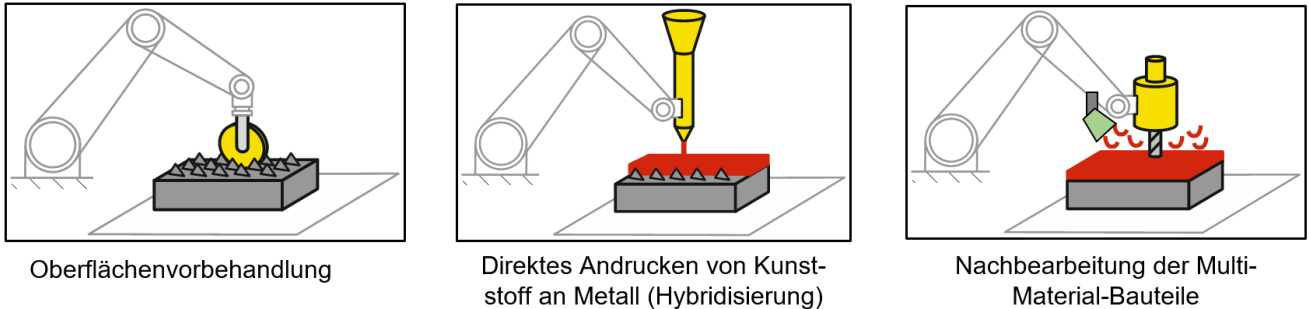


Abbildung 3-1: Angestrebte flexible und skalierbare Prozesskette ©IWF

Dies dient dem übergeordneten Ziel, neue industriell skalierbare Prozessketten für Metall-Kunststoff-Bauteile zu entwickeln, die sich durch eine geringe produktspezifische Kapitalbindung und eine hohe Stückzahlfähigkeit auszeichnen. Die Leistungsfähigkeit des Konzeptes wurde im Rahmen des Projektes anhand von zwei Beispielbauteilen nachgewiesen. Hierfür wurden exemplarisch ein Erlanger Träger sowie ein Kniegelenksrahmen einer Prothese gewählt (eingebracht durch den assoziierten Partner Otobock). Der Erlanger Träger wurde im Sinne der genannten Prozesskette gefertigt und der Kniegelenksrahmen hinsichtlich seiner Konstruktion auf die einzelnen Prozessschritte der Prozesskette überarbeitet und im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung betrachtet.

Für die Erreichung des übergeordneten Ziels ergaben sich folgende Teilziele:

1. Entwicklung und Herstellung eines Endeffektors zur robotergestützten Oberflächenstrukturierung von Freiformflächen.
2. Entwicklung und Charakterisierung des additiven Kunststoffauftrags auf Oberflächenstrukturen
3. Prozessregelung für die mehrachsige spanende Nachbearbeitung und Entwicklung einer In-Prozess-Spannerfassung. Die zu konstruierende Absaughaube wird die Späne direkt am Entstehungsort erfassen und sich an die mehrachsigen Bahnbewegungen des Roboters anpassen.
4. Validierung der entwickelten Prozesskette durch die Fertigung eines Demonstratorbauteils.

4 Ergebnisdarstellung

Im Folgenden sind die erzielten Ergebnisse nach den in Kapitel 3 vorgestellten Teilzielen geordnet dargestellt. Die Unterkapitel sind dabei nicht chronologisch, sondern den inhaltlichen Bereichen entsprechend aufgeführt. Die robotergestützten Untersuchungen sind dabei, sofern nicht anders beschrieben, an der Anlageninfrastruktur des IWF durchgeführt worden.

4.1 Verwendete Anlageninfrastruktur

Das „Incremental Manufacturing Lab“ (IML) ist ein von der DFG gefördertes Großgerät (DFG Projekt 314165083) des IWF an der TU Braunschweig und wird zur Untersuchung und Optimierung der inkrementellen Fertigung verwendet. Die inkrementelle Fertigung stellt dabei eine Sonderform der Fertigung multi-materieller Bauteile dar und reduziert, durch den Einsatz von kostengünstig vorproduzierten Halbzeugen, die Fertigungszeit von komplexen Multi-Material-Bauteilen. Die eingesetzten Halbzeuge werden innerhalb des IML mit Hilfe von additiven, subtraktiven und umformenden Prozessen weiterverarbeitet und ermöglichen so eine variantenspezifische Herstellung in einer Fertigungszelle. Hieraus ergibt sich letztlich das Potenzial einer wirtschaftlichen Fertigung von Multi-Material-Bauteilen für Klein- und Serienproduktion.

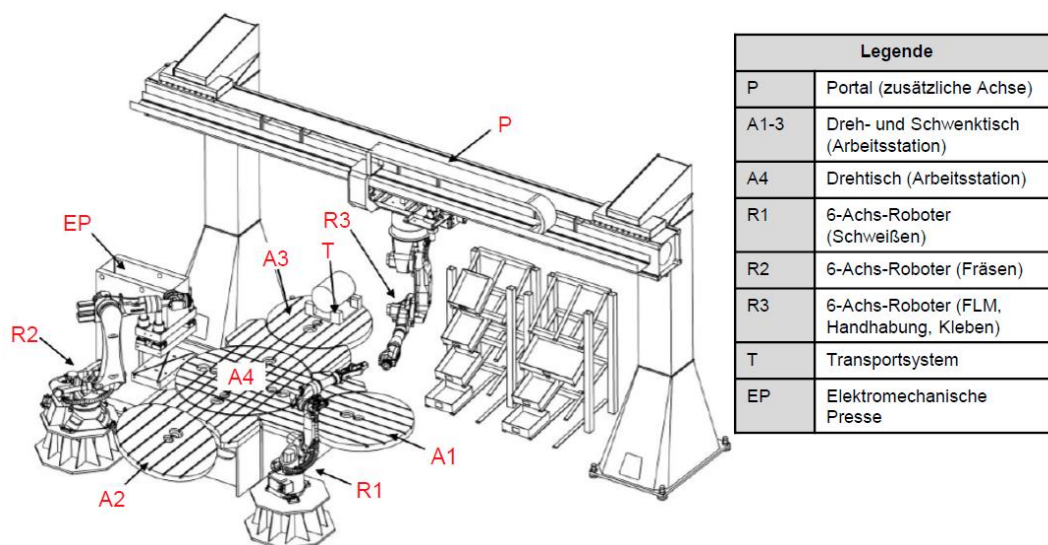


Abbildung 4-1: Schematischer Aufbau des IML [Drö17b]

Das Anlagenkonzept ist in Abbildung 4-1 dargestellt. In diesem arbeiten drei Industrieroboter (R1 bis R3) entweder getrennt an dreh- und schwenkbaren Arbeitsstationen (A1-A3) oder zusammen an einer drehbaren Station (A4) in der Mitte der Anlage. Roboter R1 ist für den additiven Metallauftrag mittels WAAM-Schweißprozess zuständig. Roboter R2 ist für die subtraktive Bearbeitung ausgelegt. Der dritte Roboter R3 besitzt ein Werkzeugwechselsystem und kann so mehrere Aufgaben erfüllen. Zum einen ist er für die Handhabungs- und Messaufgaben zuständig. Zum anderen kann mit ihm ein Schneckenextruder genutzt werden, um additiv Kunststoffteile zu fertigen. Für die maximale Flexibilität bei optimaler Platzausnutzung des Raumes, befindet sich dieser Roboter an einem Portal, das sich in einer Achse bewegen kann. So erreicht der Roboter neben dem Materiallager auf der rechten Seite, auch die elektrische Presse (EP) zu seiner linken und die Arbeitsstationen A1, A2 und A4. Infolge der hohen Flexibilität und der Anlage ergibt sich eine große Skalierbarkeit fertiger Bauteile. Neben sehr kleinen

Bauteilen ($0,01 \text{ m}^3$), die zeitgleich nebeneinander bearbeitet werden, können auch große Bauteile von bis zu 2 m^3 auf der Anlage produziert werden.

Die große Synergie des IML zu der im Verbundprojekt geplanten prototypischen industriellen Fertigungszelle ermöglicht eine sehr gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf industrielle Anwendungen. Insbesondere die Ergebnisse der experimentellen Umsetzungen der Demonstratorbauteile konnten so bereits das Potential der flexiblen Prozesskette aufzeigen.

4.2 Roboter gestützte Oberflächenstrukturierung zur Fertigung hybrider Bauteile

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zum roboter gestützten Strukturieren von metallischen Oberflächen vorgestellt. Hierbei werden sowohl die Entwicklung des roboterfähigen Strukturierungswerkzeuges beschrieben, als auch die Prozessfensteruntersuchung für die wiederholgenaue Erzeugung der Verklammerungsstrukturen vorgestellt.

4.2.1 Endeffektor zur Strukturierung von Metalloberflächen

Es wurde zunächst eine Anforderungsanalyse für die Entwicklung des roboterbasierten Strukturierungswerkzeuges durchgeführt (siehe Tabelle 8-1 im Anhang). Hierbei wurde sich an den Ergebnissen und Erfahrungen aus dem AiF-Projekt 18112N/1 „Mechanisches Aufräumen für hochfeste Metall-Kunststoff-Hybride“ orientiert. Zur finalen Auswahl und Bewertung des Strukturierungsmechanismus für den Endeffektor wurde eine Literaturrecherche zum Stand der Technik und Forschung von roboterbasierten Umformprozessen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass beim inkrementellen Blechumformen mittels „Roboshaping“, das Wirkprinzip der Werkzeugbeschleunigung einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Umformung hat [Sch07, Wes03]. SCHÄFER beschreibt außerdem in „Analyse alternativer Werkzeugprinzipien zur hämmernden Blechumformung“ fünf Wirkprinzipien, die als Ausgangspunkt für die Entwicklung des Strukturierungswerkzeuges ausgewählt und während der Konzeptphase mit Hilfe eines morphologischen Kastens für den roboter geführten Strukturierungsprozess optimiert wurden (Tabelle 4-1) [Sch07]. Aufgrund der Forderung 3.1 (Anforderungsanalyse Tabelle 8-1 im Anhang), dass Stanzkräfte während des Strukturierungsvorgangs nicht durch den Roboter aufgebracht werden dürfen, wurden weggebundene Prinzipien als Lösungskonzept verworfen.

Tabelle 4-1: Morphologischer Kasten für strukturierenden Roboterendeffektor, in Anlehnung an [Sch07]

	Kategorie der Wirkprinzipien			
	kraftgebunden			
Wirkprinzip	<i>Pneumatisches System mit Feder</i>	<i>Pneumatischer Zylinder mit Feder und Auslöser</i>	<i>Topfscheibe mit E-Motor und Feder</i>	<i>Spiralscheibe mit E-Motor und Feder</i>
Stanzfrequenz	<i>bis zu 2 Hz</i>	<i>bis zu 2,5 Hz</i>	<i>bis zu 2 Hz</i>	<i>> 2 Hz</i>
Anregungsgefahr	<i>mittel</i>	<i>niedrig</i>	<i>niedrig</i>	<i>niedrig</i>
mehrfacher Werkzeugeinsatz	<i>nein</i>	<i>nein</i>	<i>nein</i>	<i>nein</i>
Sonstiges	<i>gekoppeltes System mit Feder (sehr komplexe Kinematik)</i>	<i>Auslösemechanismus ist komplex (verkompliziert SPS)</i>	<i>Reibung an Topfscheibe begrenzt Frequenz</i>	<i>Spiralscheiben versprechen mit geeigneten Abrollagern geringere Reibung aber: Verlust der Einachsigkeit</i>
Komplexität der techn. Ausführung	<i>hoch</i>	<i>mittel</i>	<i>niedrig</i>	<i>niedrig</i>
Gewicht	<i>niedrig</i>	<i>mittel</i>	<i>mittel</i>	<i>mittel</i>

Mit Hilfe einer Leistungsbewertung wurden somit zwei indirekt kraftgebundene Wirkprinzipien gefiltert, die aufgrund ihrer Übereinstimmung mit den Anforderungen sowie der technologischen Vorteile die höchsten Wahrscheinlichkeiten für eine erfolgreiche Umsetzung boten. Es handelt sich einerseits um ein System mit pneumatischem Zylinder, der eine Druckfeder spannt sowie einem Auslöser, der den Strukturierungsprozess initialisiert. Andererseits wurde ein elektromechanisches System ausgewählt, in dem eine oder mehrere Spiralscheiben die Spannung einer Druckfeder durch die Umwandlung der rotatorischen Bewegung eines Elektromotors in translatorische Bewegung ermöglichen. Vor der endgültigen Entscheidung wurden diese beiden Prinzipien durch Vorversuche auf ihre Funktionalität hin untersucht.

Nach Auswertung der Ergebnisse wurde sich für das elektromechanische Antriebskonzept entschieden. Ein besonderer Vorteil des elektromechanischen Konzepts ist die Einfachheit der Steuerung. Ihm nach sind die Exzentrerscheiben sowohl Bewegungswandler der rotatorischen Motorbewegung in translatorische Bewegung des Werkzeugträgers, als auch selbstauslösende Initiatoren des Strukturierungsvorgangs. Dies kann durch eine geeignete Motorwahl und eine einfache Drehwinkelsteuerung frei eingestellt werden und ist bezüglich der höher erreichbaren Stanzfrequenz dem pneumatischen System signifikant überlegen. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem pneumatischen Antriebskonzept ist zudem, dass keine Ventile oder Schlauchsysteme direkt am Endeffektor, oder dessen Peripherie vorgesehen werden müssen. Stattdessen müssen nur kurze Kabelwege überbrückt werden, die wiederum nicht an den beweglichen Teilen des Endeffektors vorbeigeführt werden müssen. Somit ergibt sich auch für die Freiheitsgrade des Roboters keine externe Einschränkung.

Konstruktive Umsetzung und Fertigung

Das Strukturierungswerkzeug ist in Abbildung 4-2 dargestellt und besteht aus den nachfolgend aufgeführten Teilsystemen und Komponenten:

Basissystem

Das erste Teilsystem ist das Basissystem. Es besteht aus einer Basisplatte (7075-Aluminium), die alle übrigen Teilsysteme aufnimmt. Weiterhin gehört ein Schunk Schnellwechselsystem zu diesem Teilsystem. Mit Hilfe des Schnellwechselsystems wird ein einfacher und automatisierbarer Werkzeugwechsel am Roboter ermöglicht. Ebenfalls zum Basissystem gehören ein Sockel mit Linearführung sowie ein Sockel zur Befestigung des Druckfedersystems.

Druckfedersystem

Das Druckfedersystem teilt sich auf in eine Druckfeder, eine Gewindescheibe M48 x 2 mit Innen-sechskant an der Außenseite sowie einem Federgehäuse. Die Druckfeder weist dabei eine Federrate von 5,541 N/mm bei einer maximalen Federvorspannkraft von $336,77 \pm 21,12$ N und einem maximalen Federvorspannweg von 60,78 mm auf. Das Federgehäuse ist analog zur Basisplatte aus Aluminium (Al7075) gefertigt.

Antriebssystem

Das dritte Teilsystem ist der elektromechanische Antrieb und besteht aus einer Antriebswelle, zwei Exzentrerscheiben, einem Schrittmotor des Typs Nema 24 der Fa. Nanotec (Typ ST6018K2008) sowie zwei Lagersockeln mit einer Fest-Los-Lagerung. Sowohl die Antriebswelle als auch die Exzentrerscheiben sind dabei aus einem Vergütungsstahl (1.7225+QT) gefertigt. Die Exzentrerscheiben sind über

Passfedern mit der Antriebswelle verbunden und werden über Sicherungsringe vor einem axialen Verschieben gesichert. Zur Ansteuerung des Schrittmotors wurde der Motorcontroller (C5-E-2-09) der Firma Nanotec verwendet.

Werkzeugträgersystem

Das vierte Teilsystem besteht aus dem Werkzeugträger, der analog zur Antriebswelle aus einem Vergütungsstahl (1.7225+QT) gefertigt wurde und durch die Linearführung des Basissystems schwimmend gelagert ist. Am vorderen Ende des Werkzeugträgers befindet sich das Stanzwerkzeug, bei dem es sich um eine Stanzhülse aus der Industrie handelt [Bra16, Drö17c]. Weiterhin befinden sich am Werkzeugträger zwei Kurvenrollenlager mit Gewindezapfen, auf denen die Exzentrerscheiben abrollen. Infolge des Abrollens und des veränderlichen Radius der Exzentrerscheiben wird so deren Rotation in eine Translation umgewandelt. Als Verdrehsicherheit sind zwei zusätzliche Kurvenrollenlager mit Gewindezapfen am Werkzeugträger angebracht. Diese rollen parallel auf zwei separat an der Basisplatte angebrachten Sockeln.

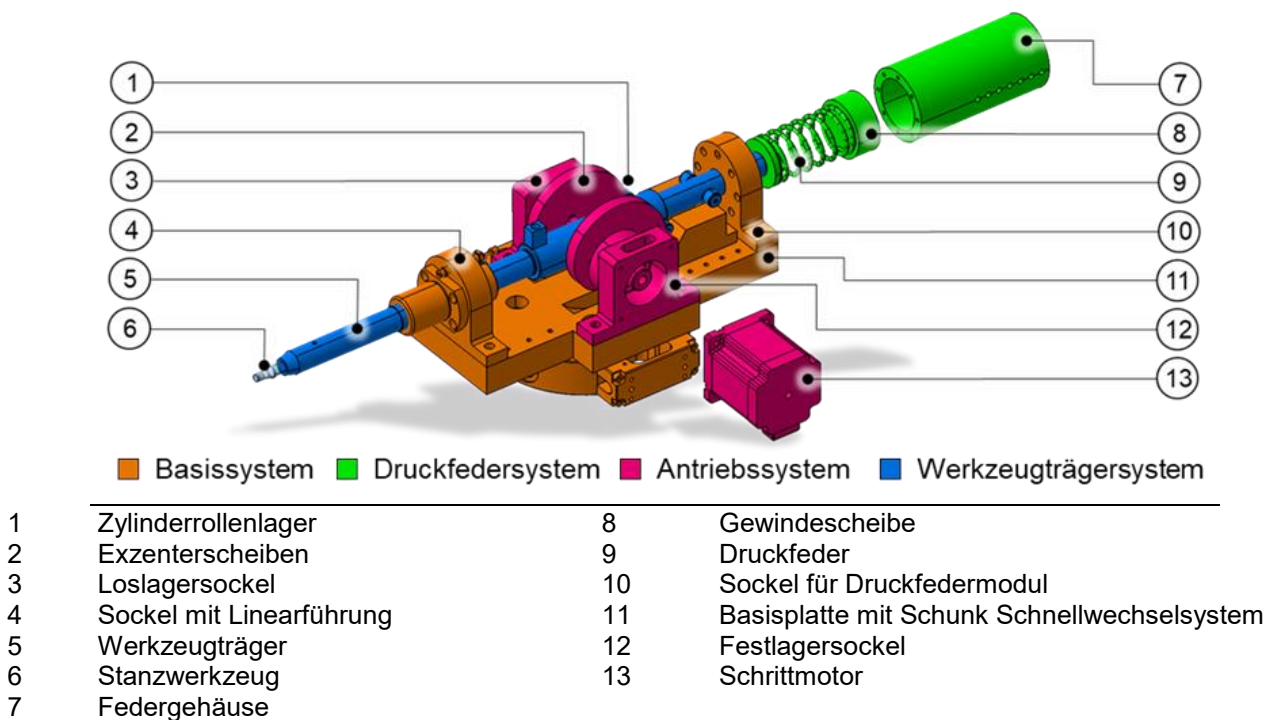


Abbildung 4-2: Roboterendeffektor zur mechanischen Oberflächenstrukturierung ©IWF

Der kinematische Ablauf des Antriebsprozesses sieht ein Vorspannen der Druckfeder durch das aufgebrachte Drehmoment des Elektromotors und die somit erzeugte Rotation der Exzentrerscheiben vor. Der Federvorspannweg ist somit konstruktionsbedingt limitiert und beträgt 21 mm. Durch eine an der Rückseite der Druckfeder eingeschraubte Gewindescheibe M48 x 2 mit Innensechskant kann die Federvorspannung manuell eingestellt und zusätzlich erhöht werden. In Abhängigkeit der Gewindesteigung ergibt sich so je Umdrehung der Gewindescheibe ein Vorspannweg von 2 mm.

Überschreiten die rotierenden Exzentrerscheiben den Kippunkt, wird der Werkzeugträger, infolge der sich entspannenden Druckfeder, beschleunigt und so das Stanzwerkzeug schlagartig auf das Werkstück bewegt. Zum Zeitpunkt des Auftreffens des Stanzwerkzeuges auf dem Werkstück wandelt sich die gespeicherte kinetische Energie zu großen Teilen in potentielle Energie um und erzeugt so die

Verklammerungsstrukturen. Verbleibende Restenergie führt infolge der Impulserhaltung zu einem Rückstoß des Werkzeugträgers. Aufgrund der schwimmenden Lagerung des Werkzeugträgers fungiert die Druckfeder nach der Beschleunigungsphase als Dämpfer für den entstehenden Rückstoß.

Die Abmaße und die Masse des vollständigen Endeffektors besitzen folgende Werte

- Länge 570 mm
- Höhe 180 mm
- Breite 220 mm
- Masse 12 kg

Der entwickelte Endeffektor zum Oberflächenstrukturieren wird nachfolgend unter dem Akronym „Fully automated Structuring Tool“ - FauST geführt und ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

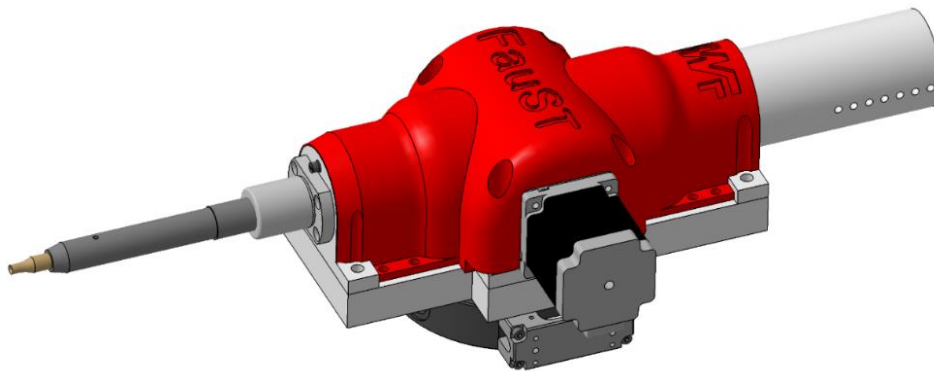


Abbildung 4-3: Fully automated Structuring Tool – FauST ©IWF

Untersuchung der Rückstoßeffekte

Zur Untersuchung entstehender Rückstoßkräfte während des Strukturierungsvorgangs sowie deren Kompensation, wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Zunächst wurden hierzu unabhängig vom Roboter während der Strukturierung von Probenblechen die Reaktionskräfte in X-, Y- und Z-Richtung über einen Kraftmesstisch gemessen und über die gesamte Prozesszeit ausgewertet. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Die Versuche wurden mit einer Federvorspannkraft von 230 N durchgeführt.

Tabelle 4-2: Versuchsparameter zur Rückstoßuntersuchung

Werkstoff	Probenstärke	Probenanzahl	Anzahl der Strukturen	Kräfte
3.3535 (EN AW-5754, AlMg3)	3 mm	2	15	F_x , F_y , F_z
1.0330 (St 12, DC-01)	3 mm	2	15	F_x , F_y , F_z

In Abbildung 4-4 ist der Versuchsaufbau sowie ein ausgewähltes Probenblech aus Aluminium dargestellt. Da der Versuchsaufbau keine automatisierte Verschiebung der Probenbleche vorsieht, wurden die Strukturabstände zunächst manuell durch ein Verschieben der Probenbleche erzeugt. Die Ansteuerung des Schrittmotors erfolgte unter Verwendung eines zugehörigen Treibers und einem System von Arduino. Bei einem Arduino-System handelt es sich um eine quelloffene Soft- und Hardwarelösung, bei welcher die Hardware aus einem vereinfachten E/A-Board und einem Microcontroller mit analogen und digitalen Ein- und Ausgängen besteht. Die Spannungsversorgung erfolgte über ein einfaches Labornetzgerät.

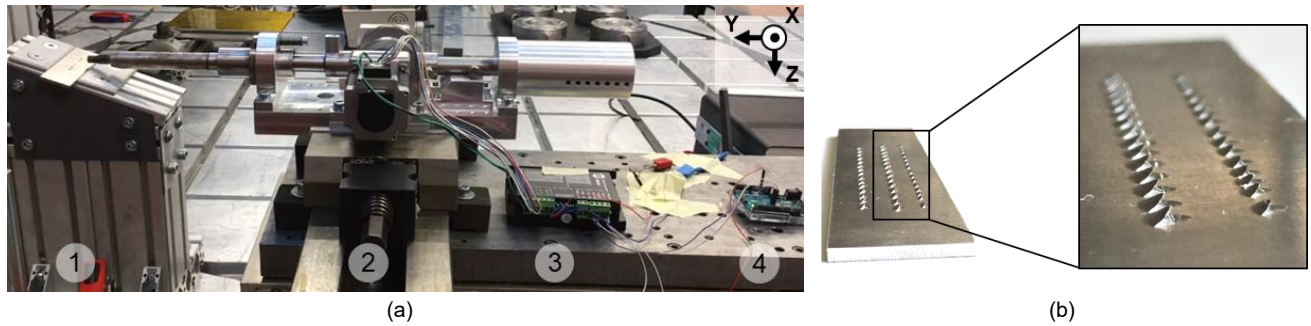


Abbildung 4-4: Versuchsaufbau für Rückstoßuntersuchung mit (a) strukturierte Aluminiumprobe (b), (1) eingespanntes Probeblech, (2) am Kraftmessstisch verspannter Endeffektor, (3) Motortreiber und (4) Arduino Uno ©IWF

Die ermittelten Reaktionskräfte sind in Tabelle 4-3 aufgeführt und zeigen eine maximale Reaktionskraft in Richtung der Bewegungsachse des Werkzeugträgers (Y-Achse, siehe oben rechts Abbildung 4-4a). Die maximal auftretenden Kräfte liegen dabei für beide Werkstoffe im Bereich von 500 – 700 N. Zur Veranschaulichung des Kraftverlaufs ist ein typischer Kraftverlauf in Y-Richtung für eine Strukturierung in Abbildung 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-3: Reaktionskräfte für DC-01 und AlMg3 im Strukturierungsprozess

DC 01	pos. Kräfte in N			neg. Kräfte in N		
Probe 1	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z
F _{max}	279	575	286	-286	-363	-478
Mittelwert	208	450	235	-198	-307	-342
Standardabw.	36	73	47	43	27	67
Probe 2	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z
F _{max}	314	632	317	-260	-340	-434
Mittelwert	220	504	222	-209	-309	-352
Standardabw.	38	90	45	27	19	50
AlMg3	pos. Kräfte in N			neg. Kräfte in N		
Probe 1	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z
F _{max}	282	664	356	-264	-542	-476
Mittelwert	213	514	172	-181	-451	-211
Standardabw.	42	97	76	30	54	94
Probe 2	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z
F _{max}	290	725	200	-224	-679	-227
Mittelwert	228	544	134	-162	-502	-163
Standardabw.	37	82	27	28	100	39

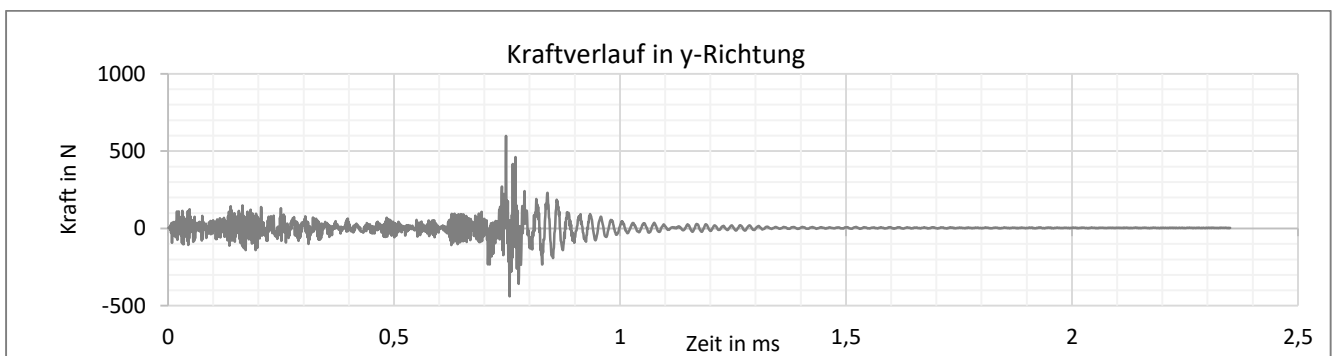


Abbildung 4-5: Ausgewählter Verlauf für Kräfte in y-Richtung für eine einzelne Strukturierung ©IWF

Die Verläufe für X- und Z-Richtung unterscheiden sich dabei lediglich in ihrem Kraftniveau. In den ersten 0,7 ms findet die Vorspannung der Feder infolge der Exzenterrotation statt. Anschließend kommt es zur Beschleunigung des Werkzeugträgers und dem eigentlichen Strukturierungsprozess mit entsprechendem Kraftmaximum. Im Anschluss kommt es durch die Druckfeder zu einer Dämpfung der Reaktionskräfte.

Zur Sicherstellung, dass auftretende Momente während des Strukturierungsprozesses die zulässigen Lastmomente des für den Einsatz geplanten Roboters nicht überschreiten, wurden die theoretisch maximal auftretenden Momente mit Hilfe der gemessenen Maximalkräfte und ihren jeweiligen Hebelarmen berechnet (siehe Abbildung 4-6).

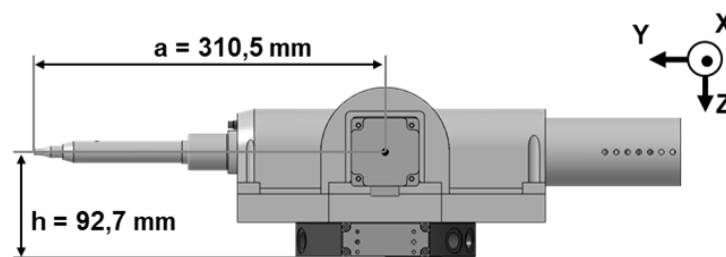


Abbildung 4-6: Hebelarme für die Berechnung auftretender Reaktionsmomente

Tabelle 4-4: Vergleich auftretender Momente mit zulässigen Lastmomenten des Roboters

Kuka KR-60 HA-C / Roboterachse		A6			
Zulässiges Lastmoment in Nm		200			
Resultierende Lastmomente in Nm		DC 01		AlMg3	
mit Hebelarm $a = 310,5 \text{ mm}$ und Hebelarm $h = 92,7 \text{ mm}$		$F_{y,max} \cdot h$	$F_{z,max} \cdot a$	$F_{y,max} \cdot h$	$F_{z,max} \cdot a$
		58,6	150,6	67,2	149,9

Diese wurden anschließend mit dem zulässigen Lastmoment der Roboterachse A6 nach Herstellerangaben verglichen. Der Vergleich ist in Tabelle 4-4 dargestellt. Basierend auf den geringen Kräften in X-Richtung wurden diese für den Vergleich vernachlässigt. Es konnte mit Hilfe der Untersuchung gezeigt werden, dass bei einer Strukturierung von Aluminium und Stahl von keiner Beschädigung der geplanten Roboterperipherie auszugehen ist.

Untersuchung der Reaktionskräfte und –Momente im robotergestützten Betrieb

Im Anschluss an die Untersuchungen ohne Robotereinsatz wurden experimentelle Untersuchungen der auftretenden Lasten am Roboter während des Strukturierungsprozesses durchgeführt. Hierzu wurde ein Kraft-Momenten-Aufnehmer (6-Achs-Sensor) für die In-situ-Messung von Reaktionskräften und Momenten zwischen Roboterflansch und Endeffektor angebracht. Der Sensor wurde dabei im Kraftfluss zwischen Endeffektor und Roboterflansch positioniert, um die auftretenden Lasten am Roboter zu erfassen. Für die Versuche wurden Strukturierungen auf Probenblechen unter einem Strukturierungswinkel von 20° und unterschiedlichen Winkelerorientierungen des Endeffektors im Bereich von 30° - 90° mit einem Inkrement von 10° eingebracht und über den Kraft-Momenten-Aufnehmer gemessen. Der Versuchsaufbau und das zugehörige Koordinatensystem des Sensors ist in Abbildung 4-7 unter Verwendung einer Seitenansicht und einer Frontalansicht dargestellt. Die Ergebnisse für die gemessenen Reaktionsmomente während der Strukturierungen in unterschiedlichen Winkelerorientierungen des Endeffektors für AlMg3 und DC 01 zeigen die Abbildungen 11-1 bis 11-6 im Anhang. Die aufgeführten Reaktionsmomente sind dabei betragsmäßig angegeben.

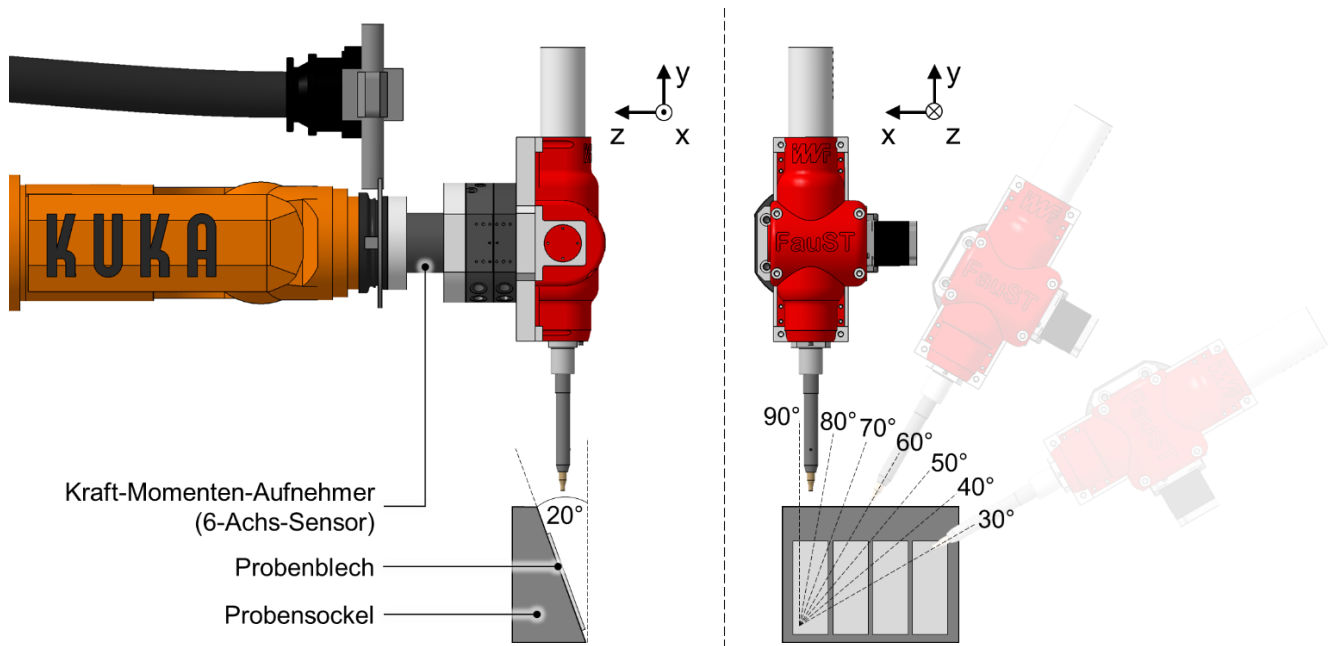


Abbildung 4-7: Versuchsaufbau zur Messung der Reaktionskräfte und –Momente während des Strukturierens im robotergestützten Betrieb mit Seitenansicht (links) und Frontalansicht (rechts) ©IWF

Der absolute Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass entstehende Reaktionskräfte im robotergestützten Betrieb geringer sind, als in den Untersuchungen mit eingespanntem Werkzeug am Kraftmesstisch. Die Ursache hierfür wird in der Nachgiebigkeit der Roboterstruktur gesehen. Die größte Kraft wurde dabei in z-Richtung für eine Strukturierung von Stahl unter einer 70°-Orientierung des Endeffektors mit $F_{z,max} = 272,8 \text{ N}$ gemessen. Aufgrund der konservativen Auslegung der Reaktionsmomente über theoretisch maximale Hebelarme und Vernachlässigung der gegenseitigen Beeinflussung der Momente (M_x , M_y und M_z) in Folge eines asymmetrisch vorliegenden Endeffektor-Schwerpunkts, liegen diese ebenfalls unter den berechneten Momenten.

Die Ergebnisse zeigen eine insgesamt hohe Abhängigkeit der Lastmomente von der Endeffektor-Orientierung. Infolge der Kopplung der Reaktionsmomente ist eine Aussage über eine vorteilbehaftete Endeffektor-Orientierung jedoch erschwert. Dennoch ermöglichen die Ergebnisse unter Verwendung der Maximalwerte sowie der Zugrundelegung einer nahezu rotationssymmetrischen Verteilung der Lasten als erste Näherung die Aufspannung eines dreidimensionalen Lastfeldes. Hierzu werden die resultierenden Momente aus den einzelnen Anteilen (M_x , M_y und M_z) zu einem resultierenden Moment M_R verrechnet, über die untersuchten Winkelorientierungen aufgetragen und durch Interpolation verbunden. Der so entstandene 2D-Graph bildet die resultierenden Lastmomente M_R im Bereich von 30° bis 90° ab. Wird der 2D-Graph anschließend kreisförmig um die Ordinatenachse gedreht, entsteht ein Raum, der die maximalen Reaktionsmomente für die untersuchten Winkelorientierungen aufzeigt. Am Beispiel von AlMg3 ist dies in Abbildung 4-8 dargestellt. Der abgebildete Raum zeigt, dass bei Winkelorientierungen des Endeffektors von 50° und 70° (bezogen zur x-z-Ebene) mit den höchsten maximalen Lastmomenten von etwa 50 Nm an der 6. Roboterachse zu rechnen ist. Die Ursache wird in der Kopplung der einzelnen Reaktionsmomente (M_x , M_y und M_z) gesehen, die für diese Winkelorientierungen zu einer ungünstigen Überlagerung führen. Unter Verwendung des dargestellten Raums der maximalen Reaktionsmomente ist es zukünftig möglich ungünstige Winkelorientierungen des Endeffektors, die sich durch eine Bahnplanung für eine Bauteilstrukturierung ergeben würden, zu vermeiden.

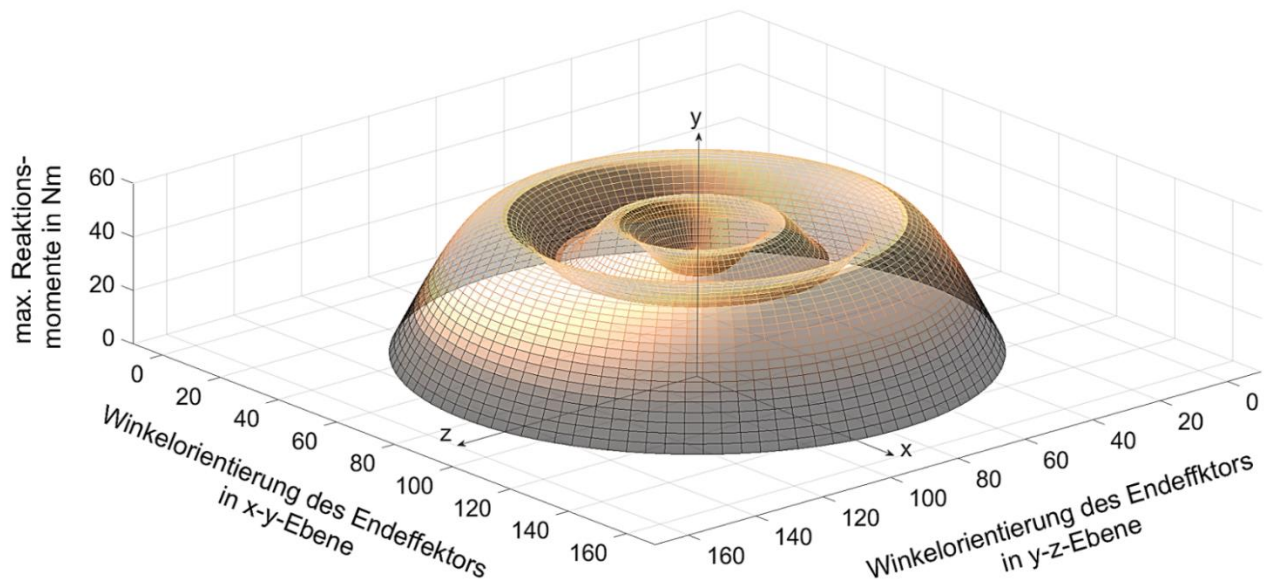


Abbildung 4-8: Aufgespannter Raum für max. Reaktionsmomente bei Endeffektor-Orientierungen im Bereich von 30° - 90° am Beispiel von AlMg3 ©IWF

Zusammengefasst wurden die Ziele der Entwicklung und Herstellung eines Roboterendeffektors zum Oberflächenstrukturieren von Metall sowie der Untersuchung von Rückstoßeffekten und auftretenden Lastmomenten an der Roboterperipherie vollständig erfüllt. Es konnte dabei gezeigt werden, dass unter Verwendung des Strukturierungswerkzeuges sowohl Aluminium- als auch Stahlproben strukturiert werden können.

4.2.2 Prozessfenster zur wiederholgenauen Strukturierung

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wurden geeignete Prozessparameter für eine hohe Verbundhaftung zwischen Metall und Kunststoff ermittelt. Dabei wurden resultierende Strukturdimensionen (Höhe, Breite, Tiefe, Aspektverhältnis u.a.) in Abhängigkeit der Federvorspannung des Endeffektors mit dem Ziel einer hohen Verbindungsfestigkeit für Stahl- und Aluminiumproben untersucht.

Für die Strukturierungsversuche wurde der bekannte Versuchsaufbau aus Abbildung 4-7 verwendet und ausschließlich in einer 90° -Orientierung des Endeffektors strukturiert. Es wurden je Probenblech neun Strukturen in einer Matrix-Anordnung von 3×3 eingebracht. Es wurde dabei ausschließlich aus einer Richtung strukturiert. In Abbildung 4-9 ist zur Veranschaulichung ein strukturiertes Probenblech aus DC 01 (1.0330) dargestellt. Für die Auswertung der Strukturgeometrien wurden die Versuchsproben längsläufig zersägt und mit Hilfe eines Konfokalmikroskops vermessen. In Abbildung 4-10 ist ein solches gesägtes Probenblech für die mikroskopische Verwendung abgebildet.



Abbildung 4-9: Versuchsprobe mit neun Verklammerungsstrukturen ©IWF

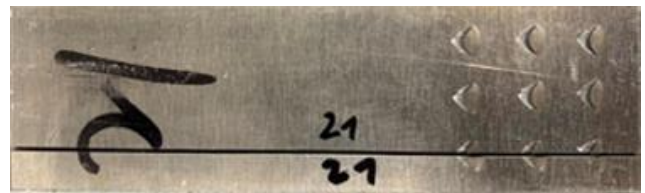


Abbildung 4-10: Gesägte Versuchsprobe für mikroskopische Vermessung ©IWF

In Tabelle 4-5 sind die Versuchsparameter für die Untersuchungen des Prozessfensters zusammengefasst. Es wurden je Parametersatz, bestehend aus Werkstoff und Federvorspannkraft, acht Probenbleche strukturiert. Insgesamt wurden 160 Probenbleche mit je neun Strukturen versehen. Die in Tabelle 4-5 angegebenen Stufen der Federvorspannung entsprechen je einer vollen Umdrehung der Gewindescheibe und somit jeweils einem hinzukommenden Federvorspannweg von 2 mm. Diese addieren sich zu dem fixen konstruktionsbedingten Federvorspannweg von 21 mm auf maximal 41 mm auf.

Tabelle 4-5: Versuchsparameter für die Prozessfensteruntersuchung

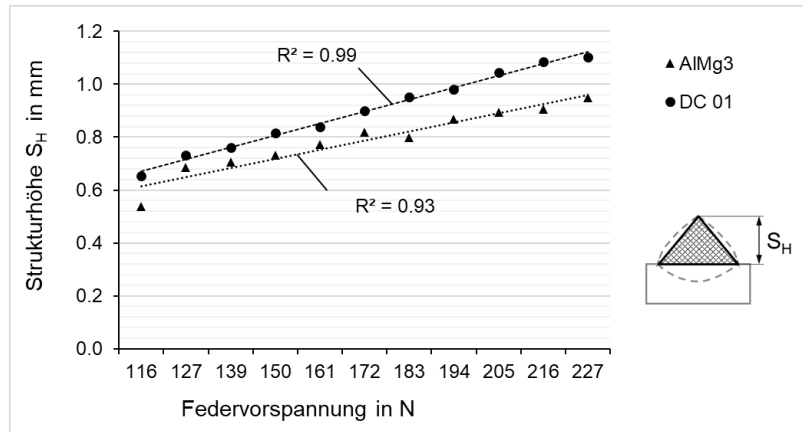
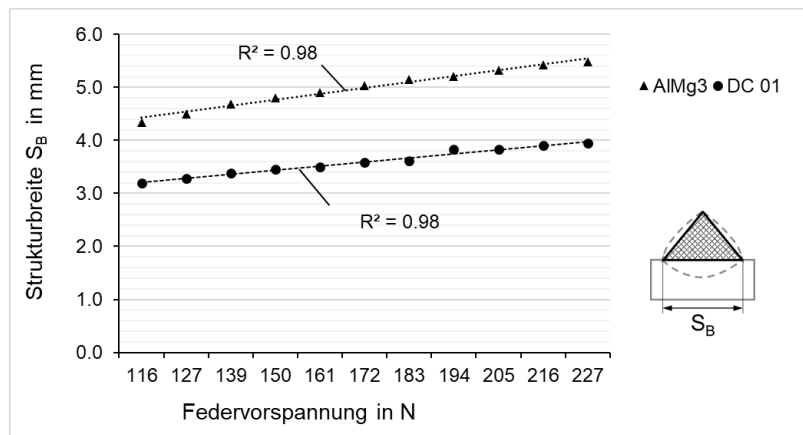
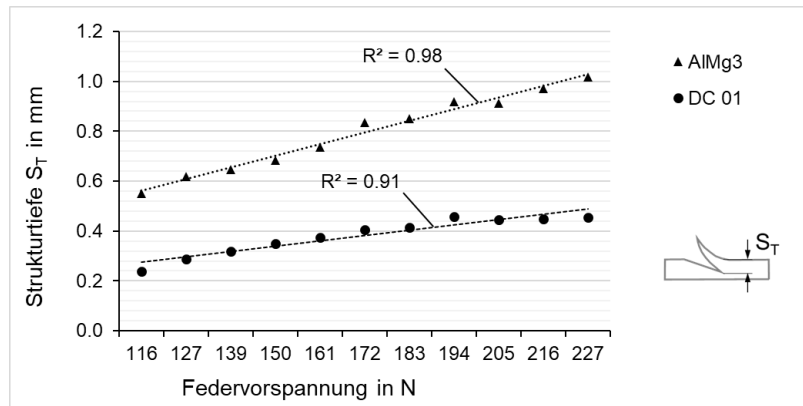
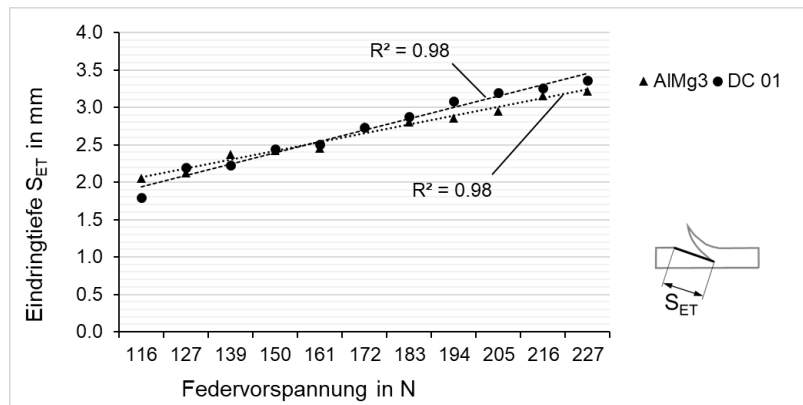
Probengeometrie $L \times B \times H$ in mm	100 x 30 x 3											
Federrate k in N/mm	5,541											
max. Federvorspannkraft $F_{n,max}$ in N	336,77 \pm 21,12											
Ungespannte Federlänge L_0 in mm	92,80 \pm 2,36											
max. Federvorspannweg s_n in mm	60,78											
Material	AlMg3 und DC 01											
Gesamter Federvorspannweg x in mm	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	
Federvorspannkraft $F_F = k \cdot x$ in N	116	127	139	150	161	172	183	194	205	216	227	

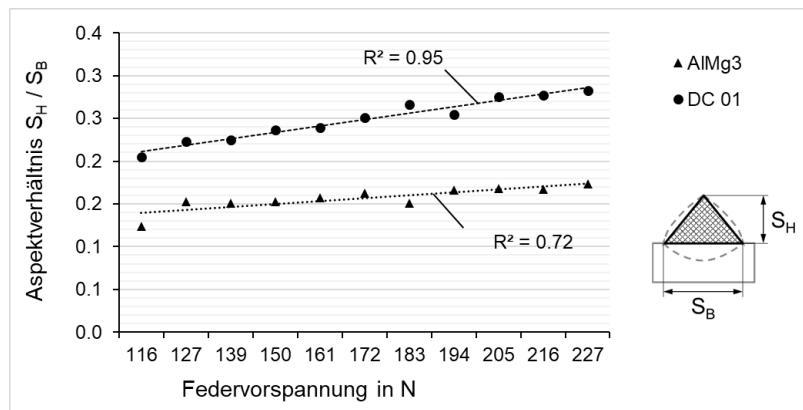
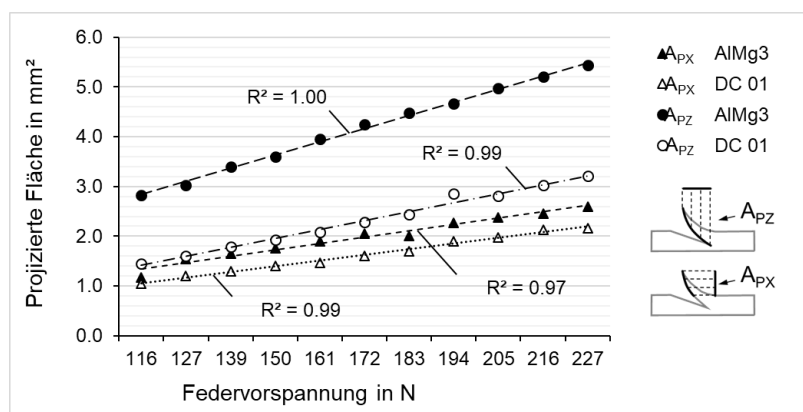
Die nachfolgende Ergebnisdarstellung basiert auf der Nomenklatur von [Drö17c]. Die Begriffe sind in Tabelle 4-6 aufgeführt.

Tabelle 4-6: Nomenklatur zur Beschreibung der Verklammerungsstrukturen

Bezeichnung	Beschreibung
α	Strukturierungswinkel zwischen Werkstückoberfläche und Werkzeugschneide
β	Keilwinkel der Werkzeugschneide
S_H	Strukturhöhe bezogen auf die Werkstückoberfläche (orthogonal)
S_B	Strukturbreite
S_{ET}	Eindringtiefe der Schneide im Strukturierungswinkel
S_T	Strukturtiefe bezogen auf die Werkstückoberfläche (orthogonal)
A_{PX}	Horizontal projizierte Fläche der Struktur über der Werkstückoberfläche
A_{PZ}	Vertikal projizierte Fläche der Struktur

In den Abbildung 4-11 bis Abbildung 4-16 sind die wesentlichen Ergebnisse der Versuche zusammengefasst. Dabei sind lineare Zusammenhänge für alle geometrischen Größen festzustellen. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigte zunächst, dass Werkstoffe höherer Festigkeit bei gleicher Strukturierungskraft geringere Strukturtiefen S_T erreichen (Abbildung 4-13). Es ergeben sich daher geringere Strukturbreiten für DC 01 (Abbildung 4-12). Die maximale Strukturbreite ist dabei durch den Durchmesser $D_{WZ} = 6 \text{ mm}$ der Werkzeugschneide limitiert. Trotz der geringeren Strukturtiefen wurden im untersuchten Kraftbereich keine markanten Unterschiede in der maximalen Eindringtiefe für die beiden Werkstoffe festgestellt. Infolge der nahezu gleichen Eindringtiefen bei unterschiedlichen Strukturtiefen ergaben sich für den Werkstoff höherer Festigkeit (DC 01) größere Aspektverhältnisse mit einer kleineren projizierten Fläche A_{PZ} (Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16). Die für die Scherzugfestigkeit relevante projizierte Fläche A_{PX} wies in Folge ähnlicher Eindringtiefen nur geringe Unterschiede auf. Es ist somit für beide Werkstoffe von ähnlichen Scherzugfestigkeiten auszugehen.


 Abbildung 4-11: Strukturhöhen S_H für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung

 Abbildung 4-12: Strukturbreiten S_B für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung

 Abbildung 4-13: Strukturturen S_T für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung

 Abbildung 4-14: Eindringtiefen S_{ET} für AlMg3 und DC 01 bei unterschiedlicher Federvorspannung


Abbildung 4-15: Aspektverhältnis S_H / S_B bei unterschiedlicher Federvorspannung für AlMg3 und DC 01

Abbildung 4-16: Projizierte Flächen A_{PX} und A_{PZ} bei unterschiedlicher Federvorspannung für AlMg3 und DC 01

In Abbildung 4-17 ist am Beispiel ausgewählter Federvorspannkkräfte die geometrische Entwicklung der erzeugten Verklammerungsstrukturen in Abhängigkeit der Federvorspannkraft für AlMg3 und DC 01 dargestellt. Die Querschliffbilder zeigen dabei eine wesentlich filigranere Strukturausbildung für den Werkstoff höherer Festigkeit (DC 01). Dies begründet sich insbesondere in der wesentlich geringeren Strukturtiefe S_T . In dem Fall ist der Keilwinkel der Werkzeugschneide $\beta = 30^\circ$ maßgeblich für die Ausbildung der Struktur verantwortlich.

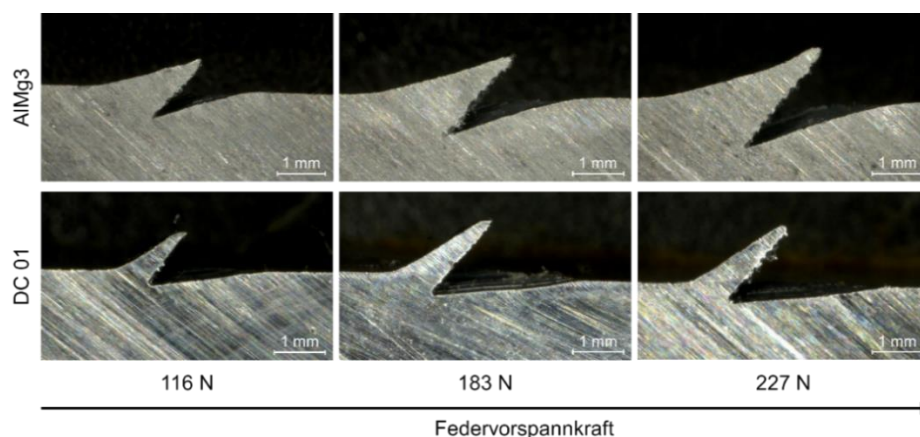


Abbildung 4-17: Entwicklung der geometrischen Ausprägung der mittels FauST erzeugten Verklammerungsstrukturen bei zunehmender Federvorspannkraft für Aluminium AlMg3 und Stahl DC 01 ©IWF

Nach Abschluss des ersten Teils der Prozessfensteruntersuchung folgte der letzte Teil mit der Untersuchung der Verbindungsfestigkeiten unter Scherzugbelastung. Hierzu wurden die strukturierten Probenbleche mit Hilfe des extruderbasierten 3D-Drucks zu Scherzugproben weiterverarbeitet. Auf Basis der zu diesem Zeitpunkt bekannten Informationen zur Druckstrategie wurden die Proben mit einem quer zur Zugrichtung orientierten Verlauf mit Kunststoff bedruckt. Für den 3D-Druck kam ABS zum Einsatz. Zur Sicherstellung einer möglichst hohen Anbindungsgüte des extrudierten Kunststoffs an die Verklammerungsstrukturen wurde eine beheizte Form zur Herstellung der Scherzugproben verwendet. Die Heizplatte wurde dabei auf eine Temperatur von 150°C eingestellt und verhindert so eine vorzeitige Aushärtung des Kunststoffs. Die Probekörper sind in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07 „Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen“ hergestellt worden (siehe Abbildung 4-18). Es liegt im Vergleich eine größere Überlappungslänge bei kürzeren Probekörpern vor. Infolge der nicht vorhandenen Haftung des Kunststoffs am Metall wird dieser Einfluss (auch von Reibungseffekten) als vernachlässigbar eingeschätzt.

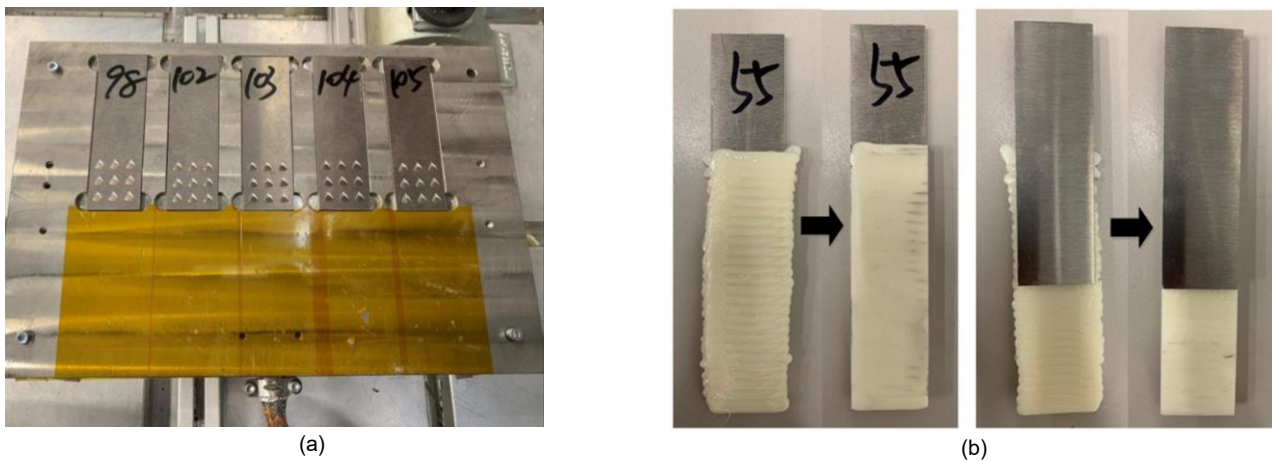


Abbildung 4-18: Herstellung der Scherzugproben im extruderbasierten 3D-Druck mit (a) der beheizbaren Vorrichtung und (b) den hergestellten Scherzugproben ©IWF

Die Ergebnisse der Scherzugtests wurden auf eine Einzelstruktur zurückgerechnet und entsprechend durch neun dividiert. In Abbildung 4-19 sind die erzielten Scherzugkräfte für eine Einzelstruktur in Abhängigkeit der Federvorspannkraft für die untersuchten Werkstoffe AlMg3 und DC 01 dargestellt. Analog zu den bisherigen Ergebnissen stellt sich ein linearer Zusammenhang der resultierenden Scherzugfestigkeiten und der eingesetzten Federvorspannkraft ein. Die höchste Scherzugkraft einer Einzelstruktur wurde für Aluminium bei 246 N gemessen.

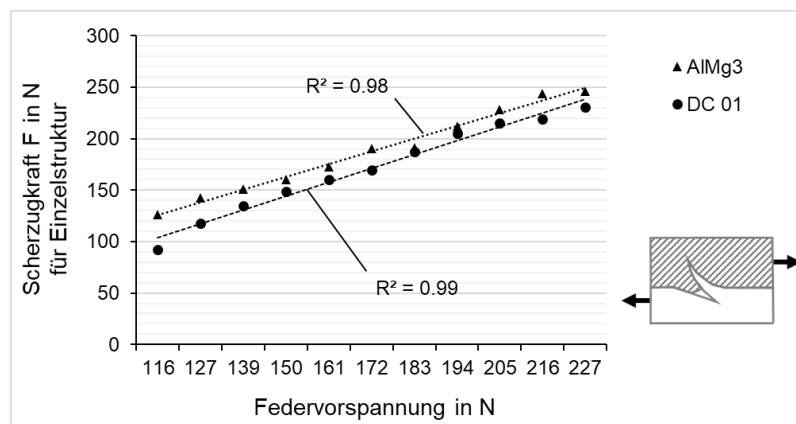


Abbildung 4-19: Scherzugkräfte von Einzelstrukturen bei unterschiedlicher Federvorspannung für Aluminium AlMg3 und Stahl DC 01

Das Versagensbild der getesteten Proben stellte sich für alle Proben gleich ein und kann als Ausknöpfen der Verklammerungsstrukturen aus dem Kunststoff beschrieben werden (Abbildung 4-20). Die Verklammerungsstrukturen aus DC 01 weisen dabei zusätzlich ein Aufbiegen auf. Während sich das Ausknöpfen in dem aufkommenden Biegemoment in einseitig überlappten Scherzugproben begründet, resultiert das Aufbiegen der Strukturen im Stahl aus deren geringem Flächenträgheitsmoment. Die im Stahl erzeugten Strukturen erzielen im Vergleich zu den Strukturen im Aluminium geringere Scherzugkräfte. Die Ursache liegt hier in den geringeren projizierten Flächen A_{PX} für DC 01 (vgl. Abbildung 4-16).

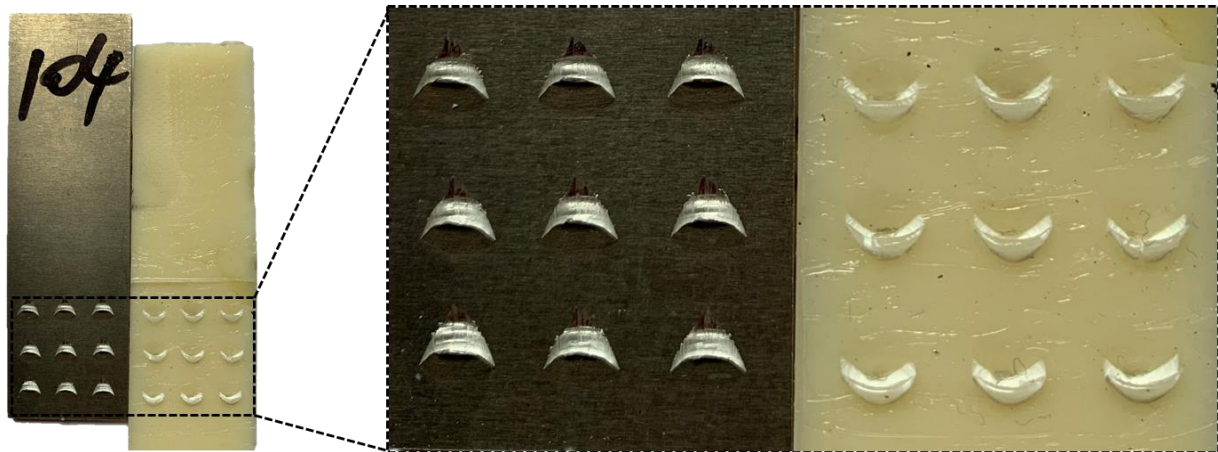


Abbildung 4-20: Bruchbild einer Scherzugprobe ©IWF

Zur Bestimmung der Scherzugspannungen einer Einzelstruktur je Federvorspannkraft wurden die bereits gemessenen Werte der projizierten Fläche A_{PX} herangezogen und mit den Scherzugkräften ins Verhältnis gesetzt. Im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen stellt sich hier keine lineare Abhängigkeit der Scherzugspannung zur Federvorspannung ein (siehe Abbildung 4-21).

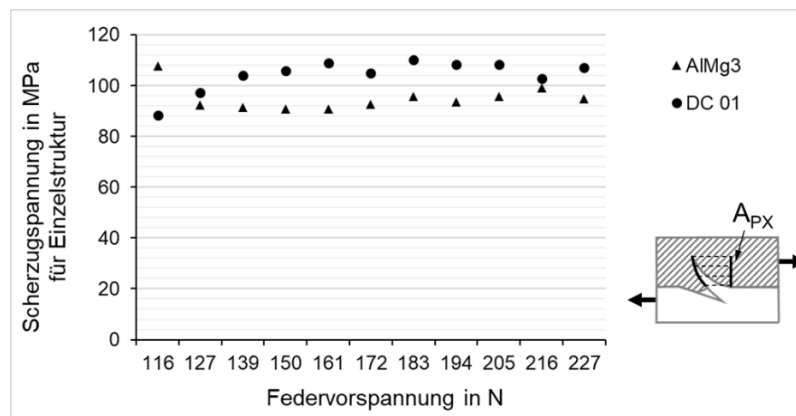


Abbildung 4-21: Scherzugspannungen von Einzelstrukturen bezogen auf ihre projizierten Flächen A_{PX} bei unterschiedlicher Federvorspannung für Aluminium AIMg3 und Stahl DC 01

Fazit zur robotergestützten Einbringung von Verklammerungsstrukturen

Es wurden erfolgreich robotergestützt Verklammerungsstrukturen in Aluminium und Stahl eingebracht und dabei signifikant die Verbundfestigkeiten zwischen Metall und Kunststoff erhöht. Es konnte gezeigt werden, dass unter Einsatz einer hohen Stufe der Federvorspannkraft im Strukturierungswerkzeug FauST hohe Scherzugkräfte für Einzelstrukturen von bis zu 246 N resultieren. Es wurde zudem gezeigt, dass die Strukturtiefe S_T einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbaren Scherzugkräfte nimmt. Dabei

nimmt die Scherzugkraft mit zunehmender Strukturtiefe S_T zu. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass unabhängig von der Stufe der Federvorspannkraft des Strukturierungswerkzeuges ein hohes Niveau der Scherzugfestigkeit von 80 MPa bis 110 MPa erreicht werden kann. Es besteht zusätzlich das Potenzial höhere Verbundfestigkeiten zu erzielen, sofern Kunststoffe mit einer höheren Festigkeit zum Einsatz kommen. Hierdurch könnte eine frühzeitige Aufweitung der Kavität im Kunststoff und somit ein Ausknöpfen verhindert werden. Eine gegensätzliche Orientierung der Strukturen wird zusätzlich empfohlen.

4.2.3 CAD-CAM Schnittstelle zur Oberflächenstrukturierung

Im folgenden Kapitel werden die Ansätze und Überlegungen zur Lösung unterschiedlicher Problematiken in der Bahnplanung des Strukturierungsprozesses vorgestellt. Zur Entwicklung der Schnittstelle wurde das CAD/CAM System „Mastercam“ genutzt. Dieses wird traditionell zur Planung von Zerspanungsprozessen in 3- und 5-Achs-Fräsmaschinen eingesetzt. Mastercam bietet keine direkte Möglichkeit Bahnen für 6-Achsen Roboter zu erzeugen. Diese Roboter sind kinematisch aufwändiger als klassische Zerspanungsmaschinen, die maximal aus drei Linearachsen und zwei Rundachsen bestehen. Dennoch können Drittanbieter Zusatzanwendungen einbringen, welchen den Funktionsumfang erweitern. „Robotmaster“ bietet beispielsweise die Möglichkeit 6-Achsen Roboteranlagen mit bis zu drei externen Linearachsen und zwei externen Rotationsachsen zu steuern. Dabei bereitet Robotmaster die Mastercam Bewegungsdaten für den Roboter auf, berechnet die Gelenkwinkel, prüft die Bewegungen auf Kollisionen, Erreichbarkeit und Singularitäten und erstellt im letzten Schritt das NC Programm für die verwendete Roboteranlage. Hier kommt wie in Mastercam ein Postprozessor zum Einsatz, der die nativen Bewegungsdaten in ein für die Maschinensteuerung lesbares Format umwandelt.

Für die Entwicklung der Schnittstellen wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt, um kritische Punkte zu bestimmen. Dabei ergaben sich vier Kernaspekte:

1. Planung der Werkzeugwege zur Erzeugung der Verklammerungsstrukturen
2. Konstanter Winkel zwischen Werkzeug und Bearbeitungsfläche
3. Konstanter Abstand zwischen den einzelnen Strukturen
4. Ansteuerung des Werkzeugs und Entwicklung des Postprozessors.

Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte beleuchtet und dargestellt, wie sich diese in Mastercam, bzw. Robotmaster umsetzen lassen.

Planung der Werkzeugwege zur Erzeugung der Verklammerungsstrukturen

Mastercam bietet bereits ein umfangreiches Funktionsspektrum an Werkzeugwegen, die darauf abzielen ein Werkstück in einem bestimmten Muster zu bearbeiten. Diese Strategien werden zum Teil von CNC Software Inc. (Hersteller Mastercam) programmiert und teilweise über externe Entwickler eingekauft und in die eigene Software implementiert. Einer dieser externen Entwickler ist die ModuleWorks GmbH mit dem Firmensitz in Aachen (D) ModuleWorks stellt in Mastercam diverse Strategien für die 5-Achsen Simultanbearbeitung bereit. Folglich wird primär nach einer ModuleWorks Strategie innerhalb von Mastercam gesucht, mit der die Oberflächenstrukturierung vorgenommen werden kann. Diese Funktion wird dann ggf. individuell auf die Bedürfnisse angepasst.

Da die Bahnen zur Erzeugung der Verklammerungsstruktur primär in einem parallelen Muster über das Bauteil geführt werden sollen, fällt die Vorauswahl auf die Strategien „Mehrachsen – parallel“ und

„Mehrachsen – entlang Kurve“. Diese sind in Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 dargestellt und wurden im Anschluss aufgrund ihrer technischen Eignung auf eine Verwendung geprüft. Nach der Evaluation und hausinternen Tests wurde sich dazu entschieden die Strategie „Mehrachsen-Parallel“ zu nutzen und an den Anwendungsfall „Strukturierung“ anzupassen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Wege parallel zueinander erzeugt werden, damit ein gleichbleibender Abstand sichergestellt wird. Sollten Wege für komplexe Freiformgeometrien geplant werden, ist darauf zu achten, dass die Wege korrekt auf die Oberfläche projiziert werden, damit eine homogene Verteilung der Strukturen auf der gesamten Oberfläche erreicht wird.



Abbildung 4-22: Strategie „Mehrachsen – Parallel“ ©robotized

Funktionsweise

Diese Strategie führt das Werkzeug in parallelen Bahnen über die Oberfläche. Dazu wird eine Leitkurve oder eine Fläche des Bauteils vorgegeben. Parallel zu dieser Leitkurve/Fläche werden parallele Offset-Kurven erzeugt, an deren Kontaktpunkten mit der Oberfläche das Bauteil bearbeitet wird

Vorteile

Gleichbleibend parallele Bahnen entlang der Oberfläche. Durch die Möglichkeit der Ausrichtung an bestehende Flächen des Bauteils gut zu automatisieren. (Keine manuelle Erzeugung von Kurven notwendig)

Nachteile

Bei zu kurzen- oder falsch positionierten Leitkurven, können ggf. ungünstige / verwirrende Bahnen entstehen. Das Werkzeug wird nicht optimal über das Bauteil geführt. Bei Freiformflächen können dadurch große Winkeländerungen und Bewegungen und Umoorientierungen im Roboter entstehen.

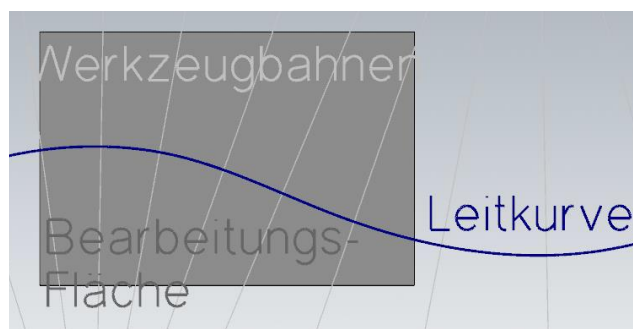


Abbildung 4-23: Strategie „Mehrachsen – Entlang Kurve“ ©robotized

Funktionsweise

Entlang einer Führungskurve werden mit einem definierbaren Abstand die Bahnen auf der Oberfläche erzeugt. Dafür wird die Führungskurve vom Start bis zum Ende betrachtet und an jeder Position eine Lotrechte Linie zur aktuellen Position auf der Führungskurve erstellt. Das Werkzeug folgt entlang der Kontaktpunkte zur Oberfläche. (Lotrecht zur Leitkurve)

Vorteile

Einfache Bestimmung des Musters über die Leitkurve. Gleichbleibender Abstand in Innenecken oder um Kanten.

Nachteile

Je nach Gestaltung der Leitkurve kann es bei starken Krümmungsänderungen in bestimmten Bereichen dazu kommen, dass die Bahnen weit auseinandergezogen bzw. gestaucht werden. Gerade das zusammenstauchen der Bahnen kann dazu führen, dass die Strukturen zu eng aneinander liegen oder sich überlagern. Es besteht die Gefahr, dass schon aufgestellte Strukturen abgetrennt werden.

Konstanter Winkel zwischen Werkzeug und Bearbeitungsfläche

Damit die notwendigen Strukturierungswinkel von 20° bis 25° zwischen Oberfläche und Strukturierungswerkzeug zuverlässig eingehalten werden, verwendet Mastercam unterschiedliche Strategien. Eine ist beispielsweise den Winkel in Abhängigkeit der Flächennormalen anzugeben, wie in Abbildung 4-24 zu sehen ist.

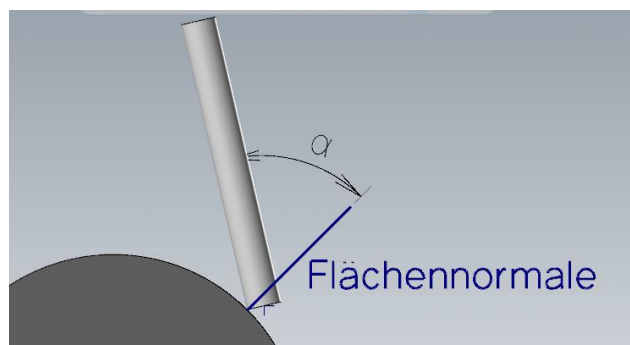


Abbildung 4-24: Einstellen des Winkels in Relation zur Flächennormalen ©robotized

Die Strategie „Mehrachs-Parallel“ bietet genau diese Möglichkeit an. Hierbei kann der Winkel zwischen Flächennormale und dem Werkzeug einfach über die Einstellung „Führungswinkel“ festgelegt werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass der Winkel immer von der Flächennormalen aus gemessen wird. Ein Winkel von 0° richtet das Werkzeug orthogonal zur Oberfläche aus. Ein eingestellter Winkel von 70° resultiert in einem Werkzeugeingriffswinkel von 20° .

Konstanter Abstand zwischen den einzelnen Strukturen

Damit ein konstanter Abstand zwischen den Strukturen sichergestellt wird, muss sowohl der Abstand zwischen den einzelnen Bahnen, als auch der Abstand der Punkte auf einer Bahn konstant bleiben. Für den gleichbleibenden Abstand der Bahnen zueinander kann im Modul „Mehrachs-Parallel“ die Funktion „Querzustellung“ genutzt werden (Abbildung 4-25)

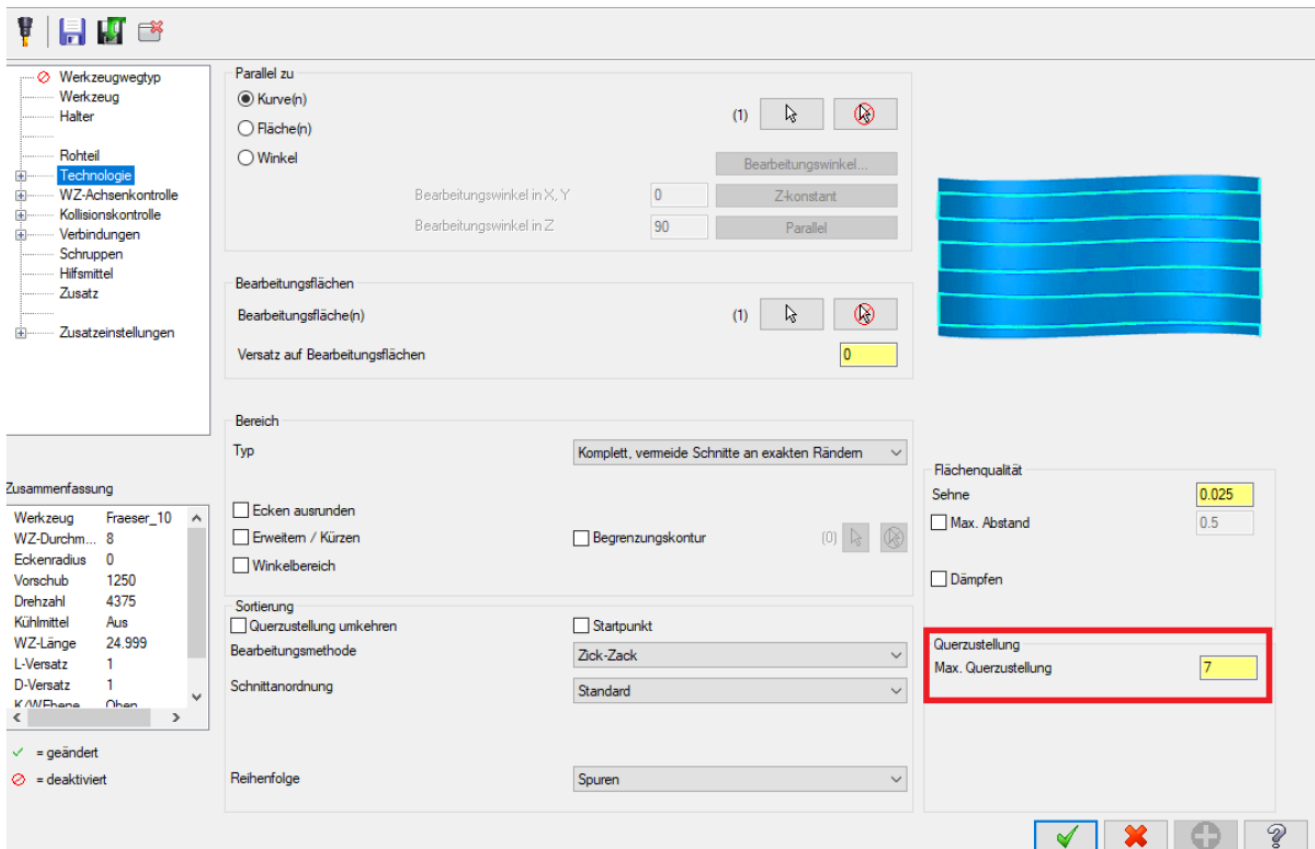


Abbildung 4-25: Einstellen des gleichbleibenden Abstands der Bahnen zueinander ©robotized

Für das Einstellen des gleichbleibenden Abstands zwischen den Punkten auf einer Bahn ergeben sich zwei Ansätze. Zum einen kann in der Bahnplanung ein fester Sehnenabstand für die Berechnung der Punkte vorgegeben werden und zum anderen kann im Postprozessor ein fester Abstand eingestellt werden. Der Unterschied und die Probleme beider Herangehensweisen sind in Abbildung 4-26 dargestellt.

Die Berechnung der Punkte in Mastercam (Abbildung 4-26a) ist trivial, da der kürzeste Abstand zwischen zwei Punkten gewählt wird. Bei stark gekrümmten Flächen kommt es jedoch zu einer Abweichung zwischen dem Abstand der Punkte auf der Oberfläche und dem Sehnenabstand zwischen den Punkten. Bei einer Anpassung des Postprozessors (Abbildung 4-26b) erfolgt die Aktivierung des Strukturierungswerkzeuges nicht an jeder berechneten Position, sondern in Abhängigkeit der vom Werkzeug zurückgelegten Wegstrecke auf der Oberfläche. Dadurch werden alle Zwischenpositionen zwischen zwei Strukturierungspunkten berücksichtigt, jedoch muss eine eigene Berechnungsroutine im Postprozessor entwickelt werden. Ein Nachteil ist jedoch, dass der reale Punktabstand nicht exakt dem vorgegebenen Punktabstand entspricht, da Wegpunkte addiert werden und erst bei Überschreiten des Punktabstands der Strukturierungsvorgang ausgelöst wird. Der reale Abstand ist somit immer minimal größer als der Vorgegebene.

Da der Eingriff in den Postprozessor wesentlich einfacher umzusetzen ist, wurde nach der Bewertung der beiden Möglichkeiten der zweite Ansatz favorisiert. Um den genannten Nachteil von Ansatz 2 zu minimieren kann der beschriebene maximale Punktabstand eingesetzt werden. Dadurch werden generell mehr Wegpunkte auf der Bahn erzeugt und bei der Ausgabe nach Überschreiten des Punktabstands abgefragt.

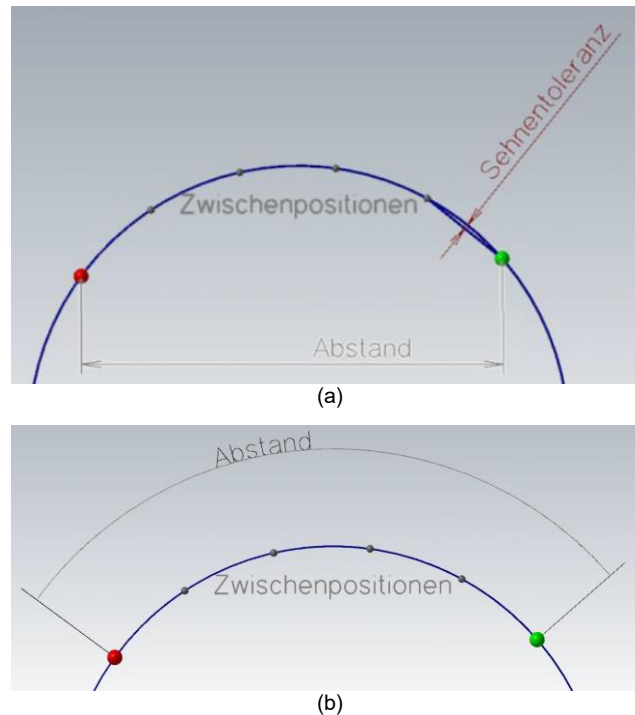


Abbildung 4-26: Vergleich der beiden Methoden zur Bestimmung der Punkte auf der Oberfläche mit (a) Berechnung im Programm und (b) Berechnung im Postprozessor @robotized

Ansteuerung des Werkzeugs und Entwicklung des Postprozessors

Zur Erstellung der Verklammerungsstrukturen muss zusätzlich zum Verfahren des Werkzeugs über die Oberfläche des Bauteils das Werkzeug aktiviert werden, um den Strukturierungsvorgang auszulösen. Beim Strukturieren müssen an jedem Punkt der Bahn folgende Ereignisse stattfinden:

- Unterbrechen der Vorschubbewegung (Halt auf dem aktuellen Punkt)
- Ansteuerung des Werkzeugs für den Strukturierungsvorgang
- Warten, bis der Strukturierungsvorgang abgeschlossen ist.
- Anfahren des nächsten Punktes

Damit die Bahnplanung unabhängig von der Infrastruktur genutzt werden kann, wurde ein Makro entwickelt, welches die Kommunikation zwischen Roboter und SPS übernimmt. Dieses beinhaltet die oben genannten Punkte und fasst diese im Unterprogramm „Struktur()“ zusammen. Das Programm „Struktur()“ wurde in KRL programmiert und hat folgenden Aufbau:

```
Struktur(int:n):
    Int n = stoptime
    Wait sec stoptime; Nach Ankunft an Punkt wird „n“-Sekunden gewartet
    $Out[30] = True; Strukturierungsvorgang wird ausgelöst
    Wait for $IN[30]= True: Strukturierungsvorgang abgeschlossen
    $Out[29] = True; Feder vorspannen
    Wait for $In[29]= True; Feder vorgespannt
    Wait sec stoptime; Nach Vorspannen „n“-Senkunden warten.
End
```

Nachdem ein Punkt angefahren wurde, wird zunächst „n“-Sekunden gewartet, damit der Roboter stillsteht. Im Anschluss wird mit dem Befehl „\$Out[30]=True“ ein Digitalsignal vom Roboter an die SPS gesendet, welches das Auslösen des Werkzeugs anfordert. Währenddessen wird der Eingang 30 des Roboters auf „False“ gesetzt. Der Roboter wartet nun so lange, bis er von der SPS das Signal erhält, dass der Vorgang abgeschlossen ist. Im Anschluss wird die Feder mit dem Signal „\$Out[29]=True“ vorgespannt und der Roboter wartet wieder darauf, bis er von der SPS das Signal erhält, dass die Feder korrekt vorgespannt ist. Im Anschluss wird wieder „n“-Sekunden gewartet, damit der Roboter nicht zu früh weiterfährt und die erstellte Struktur beschädigt.

4.3 Charakterisierung des additiven Kunststoffauftrags auf Oberflächenstrukturen

Im folgenden Kapitel wird der Materialauftrag von Kunststoff auf metallische Halbzeuge betrachtet. Im Fokus stand die Untersuchung zu Vorheiz- und Anpresskonzepten sowie Untersuchungen zur Verbundhaftung zwischen strukturierten Metalloberflächen und additiv aufgebrachtem Kunststoff. Darüber hinaus wurden Endeffektorkonzepte entwickelt und vorhandene Extrudertechnik hinsichtlich Auftragsraten und Flexibilität verbessert. Abschließend wurde das LAM (**L**aser **A**dditiv **M**anufacturing) – Modul, ein Softwarepaket für Mastercam, welches bisher für die Bahnplanung von Schweißprozessen genutzt wurde, an die Kunststofffertigung angepasst.

4.3.1 Vorheiz- und Anpresskonzepte für den additiven Andruckprozess

Anhand eines roboterbasierten Extrudersystems wurden Vorheiz- und Anpresskonzepte zur Steigerung der Verbundfestigkeit innerhalb additiv aufgebauter Strukturen sowie zwischen Aluminiumhalbzeugen und aufgedrucktem Kunststoff betrachtet. Dazu wurde die Verbundfestigkeit zwischen strukturierten Metallblechen und additiv aufgedruckten Strukturen mittels Scher-Zug-Versuchen untersucht.

Vor- und Aufheizkonzept für den Andruck von Kunststoff

Zunächst wurden allgemeine Vorversuche zum robotergeführten, extruderbasierten 3D-Druck mittels Schneckenextruder durchgeführt. Dazu wurde ABS als Material genutzt, da Bauteile im Rahmen des Projektes mit ABS gefertigt werden sollen. Zu Beginn wurde im Rahmen der Voruntersuchungen die Haftung abgelegter Kunststoffraupen auf verschiedenen Oberflächen, sowie der Verzug der Raupen beim Erkalten untersucht (siehe Abbildung 4-27). Es zeigte sich, dass durch eine verringerte Abkühlgeschwindigkeit der Raupen der Verzug (Warping) verringert werden konnte. Die unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten lassen sich zum einen durch materialspezifische Wärmekapazitäten (C) und Wärmeübertragungskoeffizienten (α) erklären. Zum anderen zeigte sich, dass ein Aufheizen des Druckbettes einen ähnlichen Effekt hatte, da die abgelegten Raupen langsamer abkühlten und so geringere Eigenspannungen im Material bildeten. Durch das verringerte Warping stieg die Flächenhaftung zwischen der ersten gedruckten Schicht und der Grundplatte. Dies äußerte sich durch den steigenden Aufwand bei der Entfernung der gedruckten Kunststoffschicht von der Druckplattform und unterstreicht die Wichtigkeit einer Temperierung des Untergrunds für den anschließenden Druckprozess. Deshalb wurden alle nachfolgenden Versuche mit einer vorgeheizten Druckplattform oder mit vorgeheizten Halbzeugen durchgeführt. Eine weitere Erkenntnis der Versuche war, dass die Haftung auf der Druckoberfläche (Druckplattform oder Halbzeuge) entweder durch eine Artgleichheit des Werkstoffs (Kunststoff auf Kunststoff) oder durch eine raue Oberflächenstruktur (größere Flächenhaftung durch größere Kontaktfläche, mechanische Verklammerung durch Hinterschnitte) anstieg.

Bauplattform /Belag	Haftung	Warping [mm]
Metallplatte	0	26
Klebstoff	1	45
Haarspray	1	25
Haarspray + Tape	2	16
PLA Platte	3	6
LokBuild	1	12
LokBuild + Aceton	2	9
Blue Masking Tape	1	20
Schleifpapier 180 (fein)	0	28
Schleifpapier 60 (grob)	1	18
MDF (2,5 mm)	0	8
Sperrholz (6 mm)	2	2
Beheizte Bauplattform (50°C)	0	nicht bedruckbar
Beheizte Bauplattform (100°C)	0	2
Beheizte Bauplattform (150°C)	0	1
Aluminiumfolie & Tape	1	10



Legende			
0	: keine Haftung	> 29	: starkes Warping
1	: geringe Haftung	15 - 29	: mittleres Warping
2	: mittlere Haftung	5 - 14	: geringes Warping
3	: starke Haftung	< 5	: kein Warping

Abbildung 4-27: Bewertung der Haftung additiver Strukturen auf verschiedenen Untergründen (Oben); Starkes Warping aufgrund nicht beheizter Druckplatte (unten) ©IWF

Für die Auslegung eines Vor-/Aufheizkonzeptes wurden, aufbauend auf den erzielten Ergebnissen, großformatige Druckversuche auf einer Heizplatte für verschiedene Kunststoffe durchgeführt. Der Unterschied zwischen Vor- und Aufheizen lässt sich wie folgt beschreiben: Wird Material (z.B. Kunststoff) vor dem eigentlichen Prozess (z.B. 3D-Druck) erhitzt, wird im Folgenden von „Vorheizen“ gesprochen. Geschieht die Erwärmung während des Prozesses, handelt es sich um „Aufheizen“. Die genutzte Vorheiztemperatur ergab sich abhängig vom Material. So wurde für ABS eine Vorheiztemperatur von 110°C bis 150°C als optimal identifiziert, da der Warping-Effekt minimiert wird (≤ 1 mm, siehe Abbildung 4-27). Für weitere Kunststoffe, die neben ABS getestet wurden, ergaben sich folgende Temperaturen der Druckplatte: PP 130°C bis 140°, PS 120°C bis 140°C und PA6+GF50 200°C bis 230° C.

Neben dem Vorheizen des Substrates wurde in weiteren Experimenten der Einfluss der im Bauteil verbleibenden Wärme auf die Verbundhaftung zwischen den abgelegten Schichten untersucht. Hierfür wurden Andruckversuche auf Kunststoffstrukturen bei unterschiedlichen Extrusionstemperaturen (190°C bis 250°C) durchgeführt. Für Temperaturen über 235°C zeigten sich Verbrennungen an der Oberfläche des verwendeten Kunststoffs (ABS). Durch die dadurch veränderten Polymerketten wurden Proben mit Verbrennungserscheinungen von der Auswertung der Scher-Zug-Versuche ausgeschlossen. Insgesamt wurden zwei Belastungsszenarien (X-Richtung-parallel zur Druckebene; Z-Richtung-normal zur Druckebene) und zwei Druckszenarien (ohne Andruck; mit Andruck) betrachtet. Dazu wurde ein rechteckiger Hohlkörper mit einer Wandstärke von 10 mm und einer Höhe von 150 mm gedruckt. Um die Festigkeiten in X- und Z-Richtung zu bestimmen, wurden Probenkörper in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-2 aus dem Körper herausgeschnitten und auf eine Dicke von 5 mm plangefräst, um die Kerbwirkung von unsauber abgelegten Bahnen zu verringern.

Der Verlauf der Schichten in den herausgeschnittenen Probenkörpern ist in Abbildung 4-28a zu sehen. Der Unterschied der Druckszenarien liegt darin, dass im Szenario „Ohne Andruck“ der Körper ohne Unterbrechung gefertigt wurde. Beim Szenario „Andruck“ wurde der Kunststoffauftrag auf halber Höhe pausiert, um auf Raumtemperatur abkühlen zu können. Im Anschluss wurde der 3D-Druck beendet und

die Probenkörper herausgeschnitten. Insgesamt wurden 192 Proben gefertigt und getestet. Durch das Andrücken an abgekühlte Strukturen sollte gezeigt werden, wie gut sich neues Material an Vorprodukte aus ABS oder schon gefertigte Kunststoffstrukturen anbinden lässt.

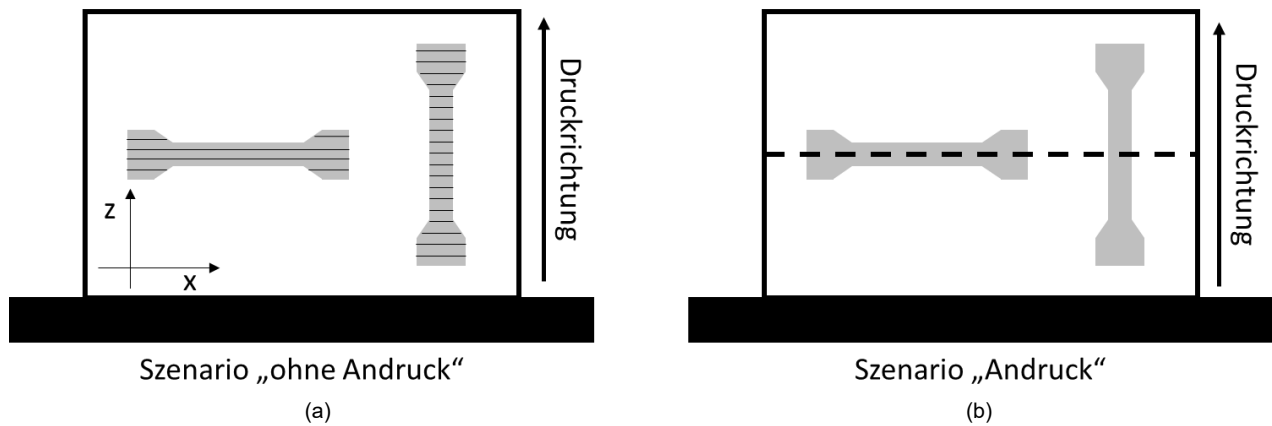


Abbildung 4-28: Druckform der Prüfkörper mit (a) Druck ohne Pause und (b) Pause nach Hälfte der Druckzeit ©IWF

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 4-29 dargestellt. Es zeigte sich, dass die Drucktemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit in X-Richtung hat (siehe Abbildung 4-29a). Die Proben zeigten über den gesamten Temperaturbereich hinweg Festigkeiten von $40,8 \pm 0,2$ MPa. Auch die Festigkeit in X-Richtung bei angedruckten Bauteilen lag bei $41,2 \pm 0,4$ MPa und damit vergleichbar hoch wie bei den Proben ohne Andruck. Die in X-Richtung erzielten Festigkeiten lagen somit unabhängig von der Temperatur ca. 6,8 % unter der vom Hersteller angegebenen Maximalfestigkeit von ABS Spritzgussteilen von 44 MPa.

Einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit in Z-Richtung ließ sich nur beim Szenario „Andruck“ beobachten. Die Festigkeit in Z-Richtung bei angedruckten Bauteilen variierte zwischen $26,5 \pm 10,2$ MPa bei 190°C und $42,0 \pm 1,1$ MPa bei 235°C Drucktemperatur. Wurden die Proben am Stück, ohne das Erkalten der unteren Schichten, gefertigt, lagen die Festigkeitswerte zwischen $40,7 \pm 0,9$ MPa bei 190°C und $41,9 \pm 1,0$ MPa bei 235°C (siehe Abbildung 4-29b).

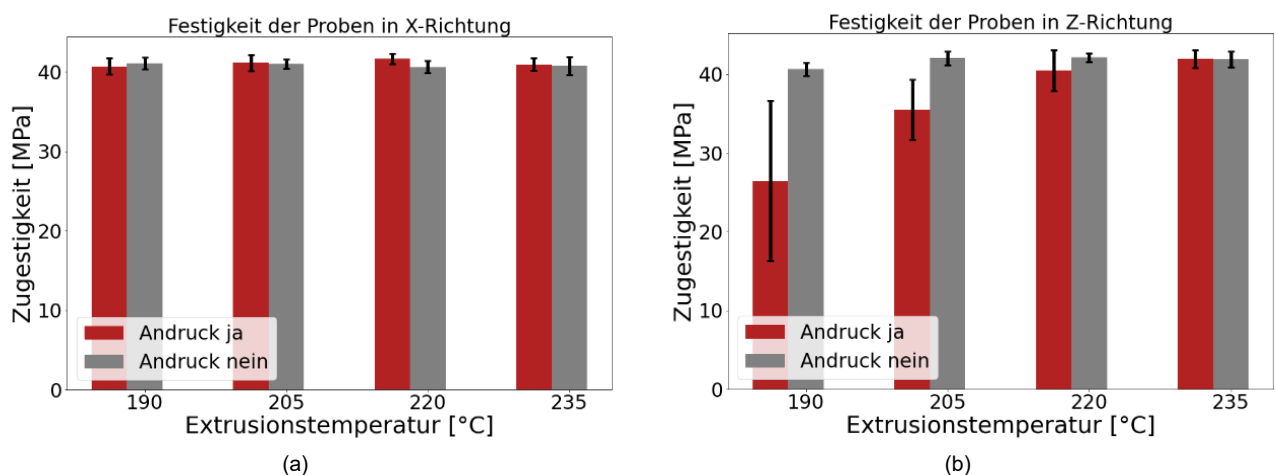


Abbildung 4-29: Verbundfestigkeit der Proben beim additiven Andruck in (a) X-Richtung und (b) Z-Richtung ©IWF

Diese Ergebnisse zeigen, dass ein Andruck auf erkalteten Kunststoffstrukturen aus ABS möglich ist, wenn die Drucktemperatur für den anschließenden Andruckprozess mit mindestens 235°C gewählt wurde. Die hohe Extrusionstemperatur von 235°C führt dazu, dass die Wärme der abgelegten Raupe

ausreicht, um die Oberfläche der darunterliegenden Schicht aufzuschmelzen und so einen kohäsiven Verbund der einzelnen Raupen zu ermöglichen.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden zusätzliche Vorheizkonzepte untersucht, um die aktuell erzielbare Festigkeit der additiven Struktur von 40 MPa zu steigern. Diese Steigerung konnte jedoch nicht erreicht werden, obwohl verschiedene Konzepte, wie Heißluft und Infrarotstrahlung, betrachtet wurden. Aus der Literatur [Col07] und eigenen Versuchen ging hervor, dass die Nutzung von Heißluft zur Erwärmung des Kunststoffes zu einem Verzug bereits gedruckter Schichten führt. Infolge der zugeführten Wärme erwärmt sich der Thermoplast über seine Glasübergangstemperatur und wird anschließend durch den Luftstrom verformt. Zudem führt die Konvektion des Wärmestroms dazu, dass sich das Extrudat aufgrund der schlechten Wärmekapazität der Luft nur sehr langsam und um wenige Grad erwärmt. Das Konzept des Infrarotstrahlers wurde unabhängig vom Extruder betrachtet, da sich dieser aufgrund der hohen Temperaturen und fehlendem Platz nicht in Düsennähe platzieren ließ. Weiterhin wäre eine fokussierte Bestrahlung der zu erwärmenden Kunststoffbahn notwendig.

Die Herausforderung bei der Umsetzung des Erwärmungskonzeptes mit Infrarotstrahlung war die Positionierung des IR-Strahlers. Wie in Abbildung 4-30a zu sehen ist, hängt die erforderliche Position des IR-Strahlers immer relativ mit der geplanten Bahn zusammen. Folglich muss sich bei Richtungsänderungen entweder der Extruder und der IR-Strahler gemeinsam mitbewegen, oder der IR-Strahler um den Extruder herumbewegen. Die gemeinsame Bewegung konnte leider nicht realisiert werden, da der Roboter in seinen 6 Achsen zwar flexibel, aber in seiner Bewegung beschränkt ist. Das Konzept der Nutzung einer Orientierungseinheit (Abbildung 4-30b) für Heizmöglichkeiten konnte anhand eines 3D-gedruckten Prototypen gezeigt werden.

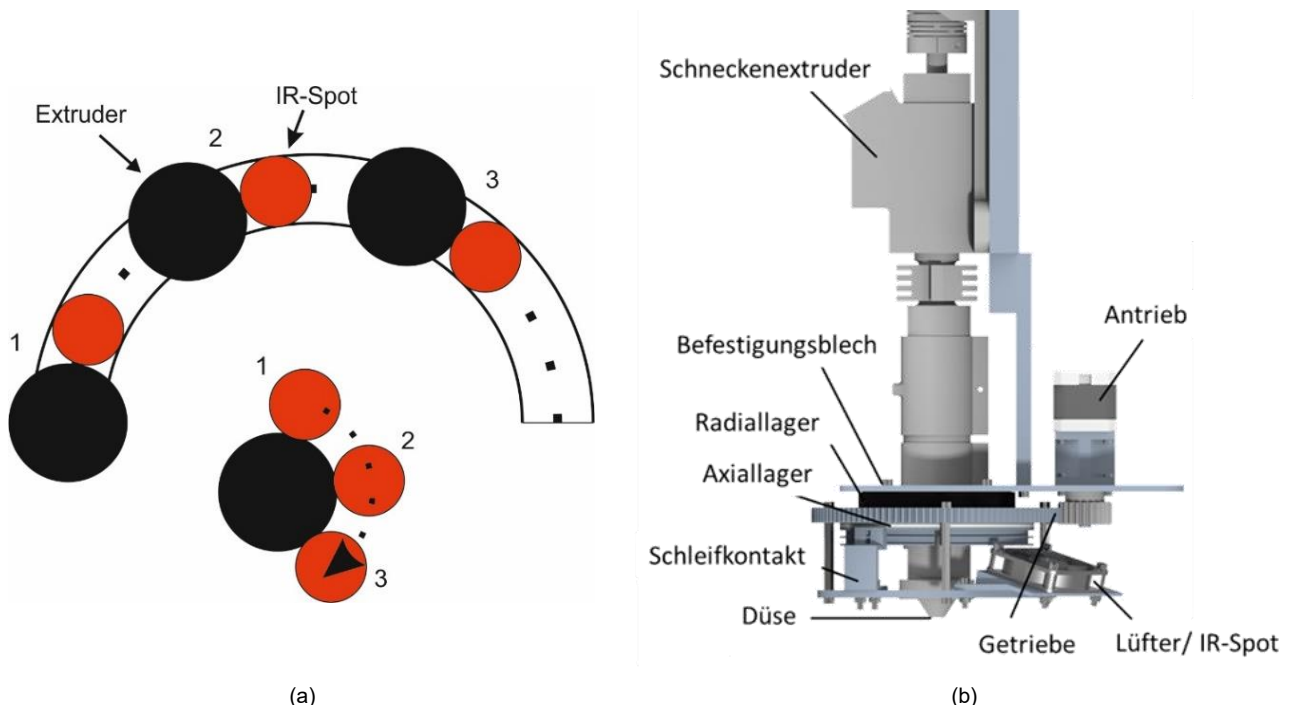


Abbildung 4-30: Konzept eines Infrarotstrahlers am Extruder mit (a) variierende Positionierung des IR-Strahlers relativ zur Bewegungsrichtung und (b) Aufbau der Orientierungseinheit am Extruder ©IWF

Eine Positionierung während des Prozesses war prinzipiell möglich, dennoch haben Bewegungsstudien gezeigt, dass die hinzugewonnene Störgeometrie die Bewegungsfreiheit des Extruders sehr stark einschränkt. Zusätzlich hätte eine Drehdurchführung für die Kabel entwickelt werden müssen, welche

die Energieversorgung des IR-Strahlers gewährleistet. Würden Kabel ohne eine solche Führung klassisch fest verbunden sein, versagen diese nach einigen Umdrehungen in dieselbe Richtung.

Das vielversprechendste Aufheizkonzept für den extruderbasierten 3D-Druck ist die im Kunststoffstrang gespeicherte Wärmeenergie zum Aufheizen vorher abgelegter Schichten zu nutzen. Eine Drucktemperatur von 235°C war bei ABS ausreichend, um sogar vollkommen erkaltetes Material so aufzuheizen, sodass eine sehr gute Haftung (40 MPa) zwischen den Schichten gewährleistet werden konnte.

Vorheizkonzepte für metallische Halbzeuge und Komponenten

Für die Erwärmung der metallischen Komponenten des Materialverbundes wurden folgende Heizkonzepte untersucht:

- Erwärmung mit Infrarot-Strahlung
- Erwärmung mittels Heißluft
- Erwärmung mittels Induktion
- Erwärmung mittels Heizpatronen

Sowohl die Erwärmung mittels Infrarot, als auch mittels Heißluft führte zu keinem Erfolg. Aufgrund der spiegelnden Oberfläche des Metalls kann die IR-Strahlung nur schlecht in das Material einkoppeln. Dadurch konnte mit dieser Vorgehensweise lediglich eine Erwärmung um wenige Grad erreicht werden. Bei den Versuchen zur Erwärmung des Metalls mittels Heißluft konnten geringfügig bessere Ergebnisse erzielt werden. Jedoch führt die Erwärmung durch Konvektion dazu, dass Flächen nicht zielgerichtet erwärmt werden können. Der Luftstrom wurde an der Oberfläche abgelenkt und verteilte sich großflächig über das gesamte Volumen der zu erwärmenden Metallkomponente. Dadurch erwärmte sich dieses zwar im Gesamten gleichmäßig, aber aufgrund der hohen Wärmeträgheit nur mit hoher zeitlichen Verzögerung. Für das gezielte Vorwärmen, bzw. das Aufheizen von Metallkörpern sind IR-Strahlung und Heißluft nicht geeignet.

Die Versuche mit Induktion und Heizpatronen verliefen erfolgreich. Es konnte gezeigt werden, dass die Nutzung von Induktion eine schnelle und zuverlässige Durchwärmung von Metallen ermöglicht. Einzuschränken ist hierbei, dass das zu erwärmende Material magnetisierbar sein muss. Aus diesem Grund kann keine allgemeine Empfehlung für das Erwärmen mittels Induktion ausgesprochen werden. Im Gegensatz dazu ließen sich Heizpatronen sehr gut dazu nutzen, Metallelemente zu erwärmen. Wichtig ist hierbei auf eine korrekte Positionierung und einen genügenden Abstand der Heizpatronen zueinander zu achten. Ist der Abstand zu groß, reicht die Wärmeleistung unter Umständen nicht aus, um die gewünschte Temperatur in der vorgegebenen Zeit zu erreichen. Sind die Patronen zu nahe beieinander, kann es zu einem Wärmestau kommen. Dadurch kann sowohl das Material, als auch die Heizpatronen selbst beschädigt werden.

Anpresskonzepte zur Steigerung der Verbundhaftung

Neben den Vorheizkonzepten wurden Versuche zu Anpresskonzepten durchgeführt. Diese hatten das Ziel die Verbundhaftung zwischen den einzelnen Kunststoffschichten zu steigern. Hierfür wurden zwei Ansätze untersucht. Zum einen wurde ein Anpressen der einzelnen Kunststoffschichten unmittelbar nach der Extrusion mittels der Düse des Extruders untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Stellungen des Extruders in Kombination mit Gleich- und Gegenlauf von Extrudat und Bewegungsrichtung des Extruders untersucht.

Es hat sich gezeigt, dass ein Druck mit geneigtem Extruder keine besseren Ergebnisse erzielt. Hierfür ist die Bewegung des Extruders in Gleich- oder Gegenlauf irrelevant. Durch die Neigung des Extruders wird der Anpressdruck verringert, der sich beim Ablegen der Kunststoffraupe zwischen bedruckter Oberfläche und Extruder aufbaut. Als beste Orientierung des Extruders wurde die „neutrale Stellung“ orthogonal zur Druckoberfläche identifiziert.

Dennoch hat sich gezeigt, dass die Wahl des Abstandes zwischen Druckoberfläche und Düse sich wesentlich auf die erreichbare Qualität des gedruckten Körpers auswirkt. Wird der Abstand zu groß gewählt, werden die Raupen nicht stoffschlüssig abgelegt und es entstehen Lücken bzw. Kerben, welche die Bauteilfestigkeit stark reduzieren. Durch die Wahl eines zu kleinen Düsenabstands besteht jedoch das Risiko, dass der Kunststoff seitlich in schon abgelegte Bahnen verläuft und die Druckqualität herabsetzt. Der Düsenabstand sollte immer kleiner gleich dem Düsendurchmesser gewählt werden, sodass ein definiertes Verdichten des Kunststoffes gewährleistet werden kann.

Zum anderen wurde ein separates Andrücken der Kunststoffraupen nach der Extrusion mit einem zusätzlichen Werkzeug untersucht. Dazu wurden die in Abbildung 4-31 dargestellten Konzepte zur Modifikation der abgelegten Kunststoffraupen aufgestellt und anschließend evaluiert:

- Nachgeführte Glattwalze zur Verdichtung jeder Kunststoffraupe nach Ablage (Abbildung 4-31a)
- Nachgeführte Zackenrolle zur Aufweitung der letzten Schicht, damit nachfolgende Kunststoffraupe eine größere Auflage-/Kontaktfläche besitzt (Abbildung 4-31b)
- Nachgeführte Nadelrolle zur punktuellen Verschränkung abgelegter Kunststoffraupen (Abbildung 4-31c)

Diese drei Konzepte wurden experimentell getestet und anhand von Zugproben evaluiert.

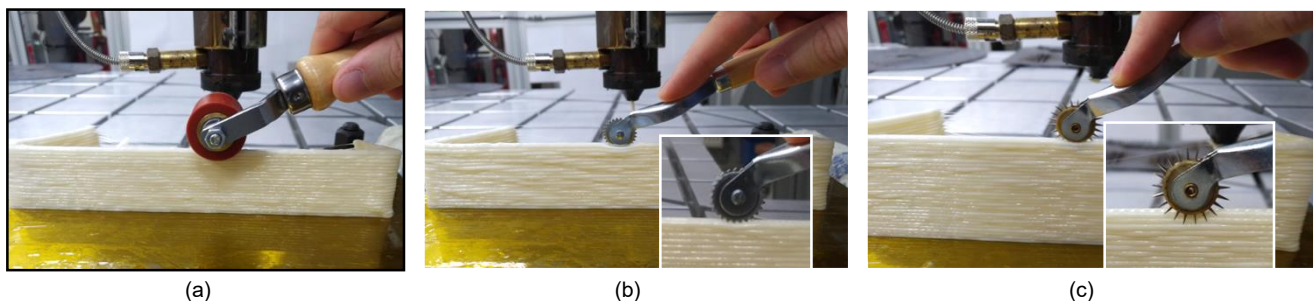


Abbildung 4-31: Anpressentechniken der abgelegten Kunststoffraupen mit (a) glatter Rolle, (b) Zackenrolle und (c) Nadelrolle ©IWF

Um belastbare Aussagen über die Anpresskonzepte machen zu können, wurden alle nachfolgend untersuchten Konzepte mit denselben Parametern (Extrusionstemperatur 200°C, Schichthöhen 2 mm, Düsenabstand 2,3 mm) hergestellt. Die verringerte Temperatur wurde gewählt, damit die Struktur, aus welcher die Proben herausgeschnitten wurden, während des Druckprozesses trotz Eigengewicht und induzierter Wärme formstabil bleibt. Durch das große Aspektverhältnis der Probengeometrie (150 mm x 20 mm x 4 mm) und den Unterbrechungen, die durch das Bearbeiten jeder Schicht mit dem Werkzeug entstanden sind, kühlt diese stärker ab, wodurch der Materialauftrag einer neuen Schicht als ein „Andruck“ an eine vorhandene (kalte) Schicht betrachtet werden kann (vgl. Abbildung 4-29). Folglich wurden bei dieser Versuchsreihe Festigkeiten im Bereich von 35 ± 4 MPa erwartet.

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 4-32 zu sehen. Vergleichsproben, welche nicht nachträglich mit den drei nachgeführten Werkzeugen bearbeitet wurden, erzielten mit Scher-Zugfestigkeiten von $37,2 \pm 1,7$ MPa Werte im Bereich der in Abbildung 4-29 dargestellten Festigkeiten.

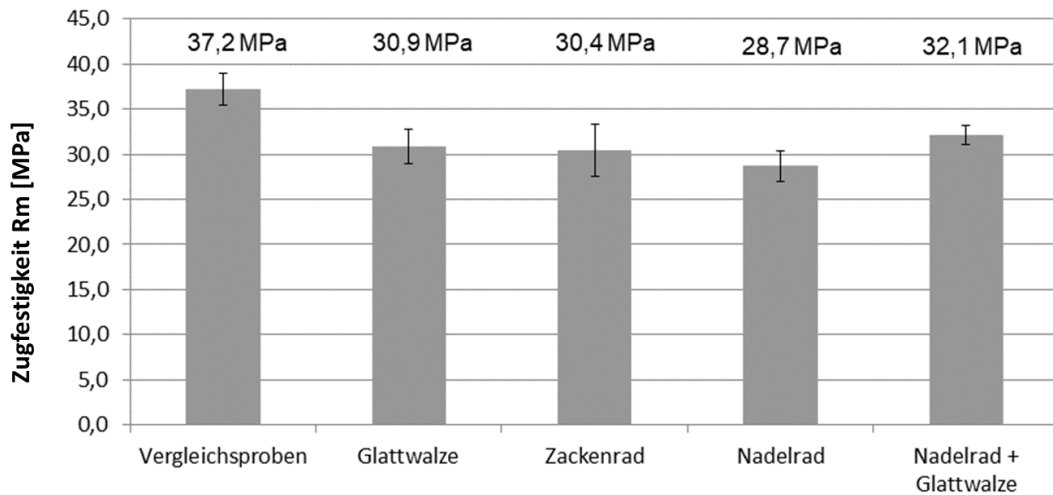


Abbildung 4-32: Erzielte Zugfestigkeiten der unterschiedlichen nachgelagerten Anpresskonzepte ©IWF

Ein Grund für die Verringerung der Festigkeiten bei den Proben „Zackenrad“ und „Nadelrad“ ist das Einbringen von Lufteinschlüssen durch die nachträgliche Perforierung der Kunststoffstrukturen. Durch den Eingriff entstandene Kavitäten, die durch die nachfolgende Kunststoffschicht nicht vollständig ausgefüllt werden konnten. Die so eingebrachten Lunker wirken sich negativ auf die Festigkeit der Struktur aus, da sie den Materialquerschnitt verringern und durch Kerbwirkung die Festigkeitswerte der Struktur reduzieren. Dies lässt sich durch die Analyse der Bruchkanten bestätigen. Wie in Abbildung 4-33 zu sehen ist, befinden sich an der Bruchkante aufgebrochene Lufteinschlüsse.

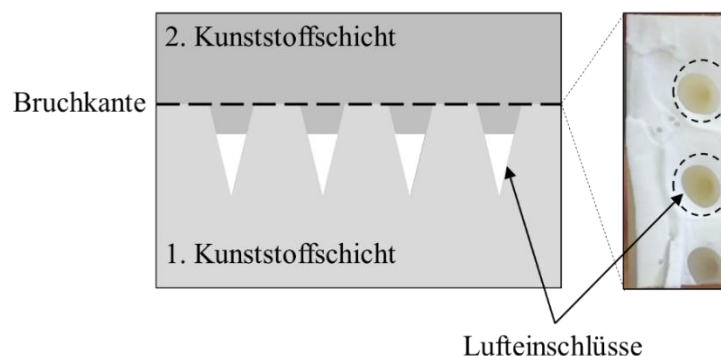


Abbildung 4-33: Schematische Darstellung der Bruchstelle bei „Nadelrad“ mit Foto der Bruchkante inklusive Lunker ©IWF

Die Verringerung der Festigkeit durch die Bearbeitung mittels Andruckrolle lässt sich durch ein stärkeres Abkühlen der zu verdichtenden Schicht im Vergleich zu den „unbearbeiteten“ Vergleichsproben (Andrücken nur durch Düse während des Druckprozesses) erklären. Zum einen wird der Druckprozess unterbrochen und die Oberflächentemperatur der Kunststoffraupen sinkt stärker ab, als es bei einem automatisierten Andrücken auftreten würde. Zum anderen vergrößert sich durch das manuelle Andrücken der Abstand zwischen der letzten abgelegten Schicht und der Extruderdüse, wodurch sich die Flächenpressung des herausströmenden Kunststoffs beim Ablegen einer neuen Schicht verringert.

4.3.2 Modifizierung und Weiterentwicklung der Extrudertechnik

Zur Steigerung der Förderleistung und einer verbesserten Ablagegüte wurde die Extrudertechnik angepasst und verschiedene Konzepte erprobt. Das Ziel dabei war dabei eine einheitliche Raupenform und eine konstante Fördermenge zu erreichen. Dabei wurde entschieden, keinen neuen Extruder zu

entwickeln, sondern den vorhandenen Extruder weiterzuentwickeln. Folgende Punkte wurden untersucht, um Probleme, wie das Nachlaufen von Material und inhomogene Aufheizung des Kunststoffgranulats zu vermeiden sowie eingeschränkte Bewegungsfreiheit durch große und schwere Aufbauten zu reduzieren:

- Modifikation analog zu Extrudern einer Spritzgießmaschine
- Einsatz von Heißschläuchen zum Materialtransport
- Verrohrung zwischen Düse und Extruder analog zur Heißkanaltechnik

Modifikation analog zu Extrudern einer Spritzgießmaschine

Da die Extrudertechnik im Spritzguss zum Großteil optimiert ist, wird dort nach Möglichkeiten gesucht, den Extruder für den roboterbasierten 3D-Druck zu verbessern. Die erste Idee, welche umgesetzt wurde, ist die Integration einer Nadelverschlussdüse. Diese kann bei Bedarf den Kunststofffluss unterbrechen und so einen definierten Endzeitpunkt bei der Kunststoffapplikation herbeiführen. Wie in Abbildung 4-34 dargestellt, wurde für die ersten Versuche eine angewinkelte Variante gewählt, um eine gute Zugänglichkeit der Nadel in den Schmelzfluss der Extruderdüse sicherzustellen. Die Düse wird durch einen Pneumatikzylinder angesteuert und verschließt so in kürzester Zeit die Düse. Während die Düse verschlossen ist, darf die Schnecke kein Material mehr fördern, da sich sonst ein Überdruck im Inneren des Extruders bildet, welcher sich schlagartig abbaut, wenn die Düse wieder geöffnet wird.

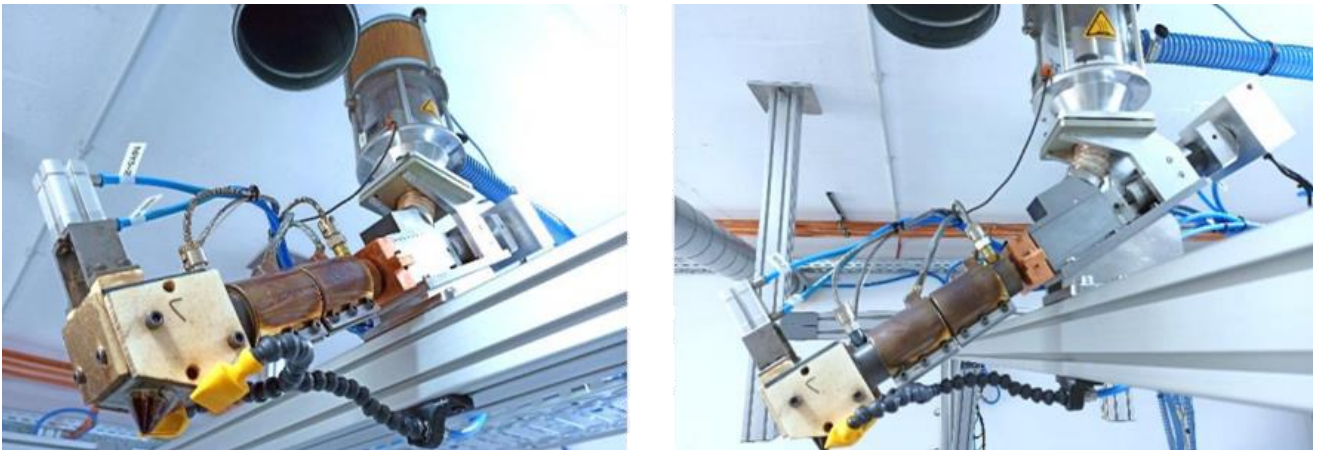


Abbildung 4-34: Modifizierter Extruder mit Nadelverschlussdüse ©3DS

Der Nutzen der Nadelverschlussdüse konnte durch das Zurückziehen der Schnecke nach dem Verschließen der Düse gesteigert werden. Dadurch konnte der ungewollte Materialaustritt nach dem Öffnen der Düse verringert und die Qualität des Druckprozesses gesteigert werden. Darüber hinaus wurde ein weiterer Heizkreis in der Düse des Extruders integriert, welcher eine gleichbleibende und homogene Austrittstemperatur des Kunststoffs sicherstellt. Zuvor waren nur Heizkreise im Bereich der Schnecke zur Temperaturregelung genutzt worden. Nachdem das aufgeschmolzene Material die Heizzonen verlassen hat, konnte es im Bereich der Düse abkühlen. Durch den weiteren Heizkreis nahe der Düsenöffnung konnte eine verbesserte und reproduzierbarere Kunststoffapplikation erreicht werden. Zudem wurde eine Wasserkühlung im Bereich der Granulatzuführung installiert. Die Wärme der Heizkreise kann so nicht in den oberen Bereich des Extruders wandern und den Eingang zur Förderschnecke verschließen. Dies führt zu einem verbesserten Verhalten im Dauerbetrieb und zu weniger Störungen bei langen Druckzeiten. Durch den zusätzlichen Einbau eines Materialzwischenlagers, kann vorher ge-

trocknetes Material aufgenommen und für den 3D-Druck vorgewärmt werden. So können gleichbleibende Bedingungen für den Druckprozess eingehalten werden, auch wenn die Umgebungstemperatur variiert. In Tabelle 4-7 sind zusammenfassend die technischen Daten des Extrudersystems dargestellt.

Tabelle 4-7: Technische Daten des Extrudersystems

Äußere Abmessungen 761 mm x 52 mm x 92 mm	Schneckentyp Langkompressionsschnecke	Schneckendurchmesser 14 mm	Kompressionsverhältnis 3,1
Art der Heizzufuhr Düsenheizbänder	Heizleistung des Systems 2 x 700 W / 2 x 300 W	Kühlung des Systems aktiv (Wasserkühlung)	Temperaturbereich T ≤ 300 °C
Theor. Austragsleistung ≤ 2,3 kg/h (materialabhängig)	Arbeitsbereich 800 mm x 800 mm x 700 mm	Max. Verfahrensgeschw. 100 – 150 mm/s	Wiederholgenauigkeit 0,2 mm
Art des Antriebs Brushless-DC-Motor	Antriebsmoment 22,10 Nm	Ausgelegt für folgende Materialien: ABS, SAN, PMMA, PP, PC/ABS, PC, PLA, TPE	
Düsendurchmesser 1,8 - 3 mm	Art der Austrittsdüse konventionell mit Nadelverschlussdüsensystem		

Einsatz von Heißschläuchen zum Materialtransport

Neben der Weiterentwicklung des Extruders wurden weitere Ansätze zur Materialförderung für den extruderbasierten 3D-Druck untersucht. Zunächst werden die Ergebnisse der Nutzung von Heißeitern dargestellt. Wie in Abbildung 4-35a zu sehen ist, wird der Heißeiter direkt mit dem Extruder verbunden, der für das Aufschmelzen des Kunststoffs und den nötigen Druck zur Förderung des Materials genutzt wird. Der Heißeiter dient dazu, den aufgeschmolzenen Kunststoff auf dem Weg zur Düse flüssig und auf der definierten Verarbeitungstemperatur zu halten. Die Düse wird weiterhin für die Applikation des Kunststoffs genutzt. Wie in Abbildung 4-35b zu sehen ist, ermöglicht der Heißeiter eine Förderung des geschmolzenen Kunststoffs.

Dennoch konnten mit dem Setup keine zufriedenstellenden Druckergebnisse erzielt werden, da der erzielte Förderdruck des Extruders nicht ausreichend hoch war, um eine gute Anbindung zwischen Druckplattform und Kunststoff zu erzeugen. Dennoch verspricht dieser Ansatz großes Potenzial. Durch die Entkopplung von Extruder und Düse können größere Extruder genutzt werden, die ansonsten für kleinere und wenig steifere Roboter zu schwer wären. Basierend darauf lässt sich eine größere Freiheit in der Bewegung der Düse erreichen, da unnötige Störgeometrien nicht mitbewegt werden müssen. Der Ansatz wurde in diesem Projekt nicht weiter betrachtet, wird seitens der Fa. 3D-Schilling und dem IWF möglicherweise in einem Folgeprojekt weiter untersucht.

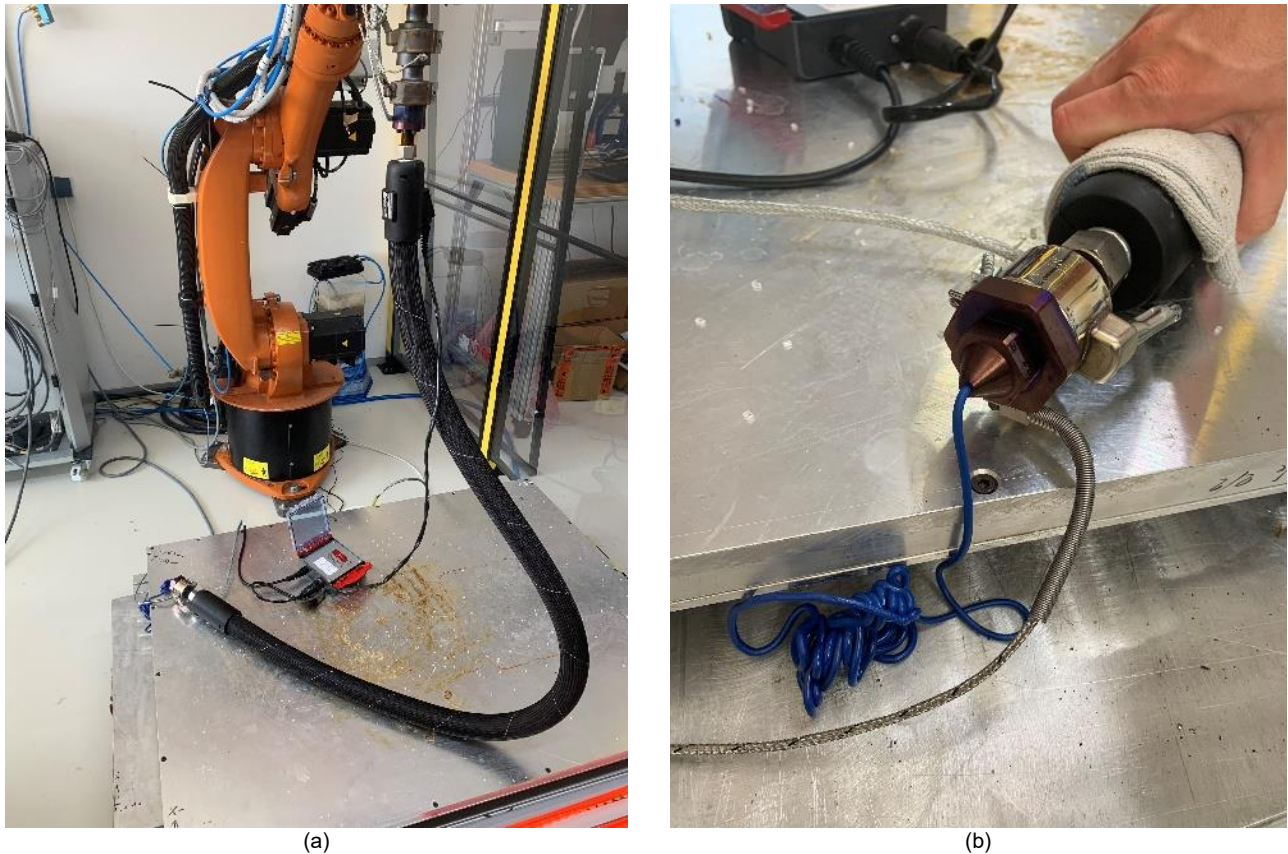


Abbildung 4-35: Versuchsaufbau zum Einsatz von Heißleitern für den Einsatz im extruderbasierten 3D-Druck mit (a) Gesamtsystem und (b) Funktionstest ©3DS

Verrohrung Düse und Extruder analog Heißkanaltechnik

Zuletzt wurde untersucht, ob das Konzept der Trennung von Extruder und Auftragsdüse mit Spritzgusstechnik umgesetzt werden kann, da Spritzgießmaschinen prozesstechnisch einen ausreichend hohen Druck erzeugen können. Es wurde ein Adapter zur Verbindung des Heißkanals und dem Extruder der Spritzgießmaschine entwickelt. Der Heißleiter sorgt dafür, dass der Kunststoff im flüssigen Zustand zur Düse geleitet wird. Die Düse ist, wie bei den ersten Versuchen am robotergeführten Extruder, beheizt, damit diese durch ein mögliches Abkühlen des Kunststoffs in Düsennähe nicht verstopft. Bei ersten Vorversuchen hat sich gezeigt, dass die Verrohrung zwischen Düse und Spritzgussextruder positiv zu bewerten ist. Die Spritzgießmaschine kann weggesteuert ausreichend Druck aufbauen, sodass aufgeschmolzener Kunststoff zuverlässig die Auftragsdüse verlässt. Dieser kann aufgrund des hohen Anpressdrucks der Spritzgießmaschine zuverlässig verarbeitet werden. Darüber hinaus lässt sich der Kunststofffluss durch die in der Maschine verbaute Technologie zuverlässig regeln, sodass gleichmäßige Bahnen abgelegt werden können. Der Ansatz wurde im Rahmen des Projekts jedoch nicht weiterverfolgt, da das Konzept des robotergeführten Extruders im Vergleich einen geringeren Bauraum benötigt. Dennoch konnte gezeigt werden, dass der Nutzen von fest verrohrten oder flexiblen Heißleitern eine weitere Möglichkeit darstellt Bauteile im Fused Deposition Modeling-Verfahren (FDM-Verfahren) zu fertigen. Beide heißleiterbasierten Ansätze bieten großes Potenzial, welches in zukünftigen Projekten untersucht werden kann.

4.3.3 Prozesslandkarte für den Kunststoffauftrag auf Verklammerungsstrukturen

Zunächst wurden die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern, wie der Druckgeschwindigkeit, dem Extrusionsvolumen und dem Abstand der Düse ermittelt. Neben Untersuchungen zum Einfluss der Kühlung während des Druckprozesses, wurden Testreihen zur Erzeugung definierter Raupenbreiten und Schichthöhen einzelner Bahnen durchgeführt. Außerdem wurden die Parameteruntersuchungen zu Schichthöhe und Raupenbreite auf weitere Kunststoffe ausgeweitet, um mögliche Übertragbarkeiten aufzuzeigen. Zu Testzwecken wurden zunächst einfache Hohl- und Vollkörpergeometrien (Würfel, Halbkugel, Quader) genutzt, um die Erkenntnisse später auf die Demonstratoren zu übertragen. Abschließend wurden Druckversuche auf strukturierten Aluminiumproben durchgeführt, um die Verbundhaftung zwischen Metall und Kunststoff zu charakterisieren und die Prozesslandkarte für den additiven Andruckprozess zu finalisieren.

Allgemeine Parameteruntersuchungen zum extruderbasierten 3D-Druckprozess

Zu Beginn wurde ein stark vereinfachtes Modell zur Strangablage aufgestellt (siehe Abbildung 4-36). Es beinhaltet die für den Extrusionsprozess wichtigsten Zusammenhänge. Dabei wurden folgende Vereinfachungen getroffen: Es wird davon ausgegangen, dass der Druck im Extruder unabhängig vom Düsenabstand und der Motordrehzahl (n_{Motor}) ist. Die Form und der Durchmesser (d) der Düse haben keinen Einfluss auf die Form des abgelegten Stranges. Der Kunststoffstrang wurde als Rechteck (Höhe der Schicht „ h “ mal Breite der Bahn „ b “) approximiert. Die Viskosität des Extrudats wurde beim Düsenaustritt als vernachlässigbar angenommen. Die Geschwindigkeit (v_{Robot}) des Roboters wird während des Prozesses als konstant angenommen. Die abgelegte Kunststoffmenge soll gleich der extrudierten Kunststoffmenge sein. Auf Basis des Modells wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Folgende Zusammenhänge wurden untersucht.

- Einfluss der Motordrehzahl n_{Motor} auf den geförderte Kunststoff-/Volumenstrom Q
- Einfluss der geförderten Kunststoffmenge Q und der Verfahrgeschwindigkeit des Roboters v_{Robot} auf die Schichthöhe und die Raupenbreite b

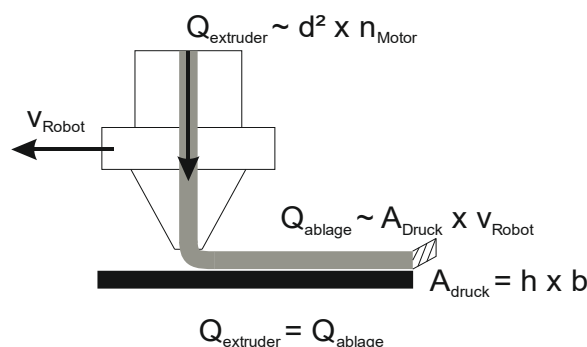


Abbildung 4-36: Modell zur Bestimmung der zu untersuchenden Parameter (n_{Motor} , v_{Robot} , h , b) beim 3D-Druckprozess ©IWF

Es konnte gezeigt werden, dass ein proportionaler Zusammenhang zwischen der geförderten Kunststoffmenge und der Drehzahl besteht (siehe Abbildung 4-37). Verdoppelt sich die Drehzahl, so verdoppelt sich auch die geförderte Kunststoffmenge. Die Versuchsreihen wurden über den gesamten Drehzahlbereich des Motors durchgeführt. Da der Motor über ein Getriebe (1:32) mit der Schnecke des Extruders verbunden ist, lässt sich die Proportionalität auf den Zusammenhang zwischen Schnecken-drehzahl und Fördermenge übertragen. Der Versuchsbereich wurde für n_{Motor} im Bereich

[500 U/min; 2500 U/min] definiert, da Drehzahlen kleiner 500 U/min, aufgrund der geringen Extrusionsmenge, eine unzureichende Produktivität aufweisen. Das Maximum wurde mit 2500 U/min definiert, da höhere Drehzahlen mit der verwendeten Motor-Getriebe-Konfiguration nicht realisiert werden konnten.

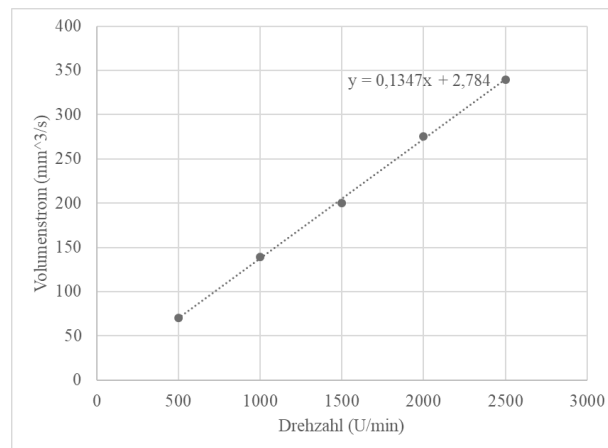


Abbildung 4-37: Gemessener Zusammenhang zwischen Schneckendrehzahl und Fördermenge des Extruders bei 1 mm Düsendurchmesser und freilaufendem Extruder bei ABS ©3DS

Untersuchung der Raupenbreite und Schichthöhe

Bei diesen Versuchen wurde eine statistische Versuchsplanung durchgeführt. Die untersuchten Extrusionsparameter sind in Tabelle 4-8 dargestellt. Alle Parameter wurden vollfaktoriell untersucht.

Tabelle 4-8: Parameter zur Eingrenzung des Parameterraums "Schichthöhe und Raupenbreite"

Parameter	Wertebereich					
	500		1000		1500	
Motordrehzahl [U/min]						
Düsenabstand [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Robotergeschwindigkeit [m/s]	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03

Der gewählte Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-38 zu sehen. Zur Ermittlung der Schichthöhe und Raupenbreite wurden je Bahn fünf Messpunkte im Abstand von jeweils 35 mm gewählt. Um den Einfluss von Beschleunigungsvorgängen durch Richtungsänderungen in den Ecken auszuschließen, wurde jeweils der erste und letzte Messpunkt 20 mm entfernt von den Kurvenfahrten platziert.

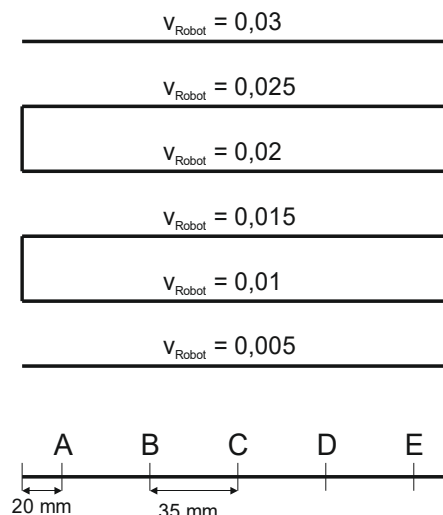


Abbildung 4-38: Bahnplanung für die Versuchsdurchführung (oben), Darstellung der Messpunkte für eine Bahn (unten)

Bei der Auswertung der Versuche hat sich gezeigt, dass die Motordrehzahl und die Druckgeschwindigkeit sich gleichermaßen auf die Parameter „Schichthöhe und Raupenbreite“ auswirken. So bewirkte eine Verdopplung der Motordrehzahl bei gleichzeitiger Verdopplung der Geschwindigkeit keine erkennbare Änderung in der Bahngeometrie. Deshalb wurde für die Darstellung des Einflusses des Düsenabstandes auf die Raupenbreite und -höhe im Folgenden mit dem Quotienten aus Motordrehzahl und Druckgeschwindigkeit gearbeitet, um den Einfluss der abgelegten Kunststoffmenge pro Millimeter Druckstrecke besser identifizieren zu können. Dieser Parameter wird normierte Motordrehzahl definiert und hat die Einheit Umdrehungen pro Millimeter:

$$\frac{n_{Motor}}{v_{Robot}} = \frac{U}{\text{min}} / \frac{\text{mm}}{\text{s}} \Leftrightarrow \frac{U}{\text{mm}}$$

Der Düsenabstand hat einen wesentlichen Einfluss auf die Raupenbreiten und Schichthöhen. Dennoch scheint der Düsenabstand keinen signifikanten Einfluss auf die Fördermenge zu haben, da je nach eingestelltem Düsenabstand die abgelegte Schnittfläche der Bahn orthogonal zur Bewegungsrichtung des Roboters konstant bleibt (siehe Abbildung 4-39).

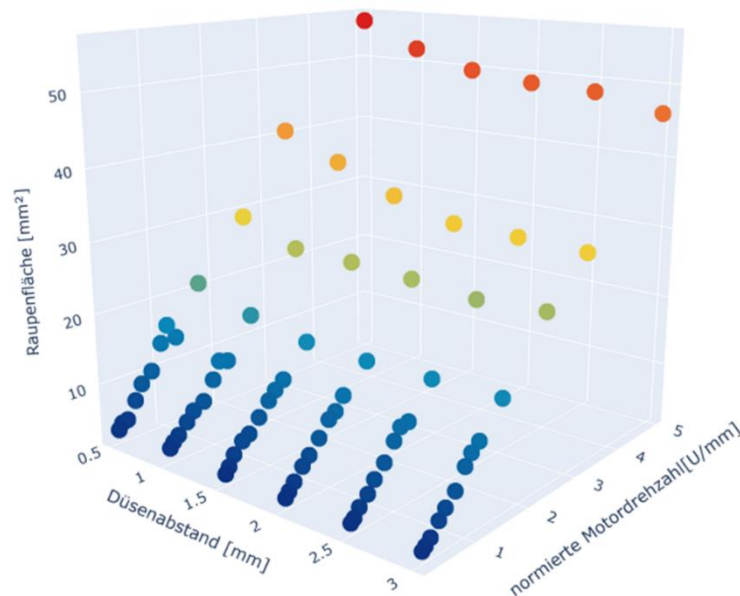


Abbildung 4-39: Abhängigkeit der Bahnschnittfläche von Düsenabstand und normierter Motordrehzahl ©IWF

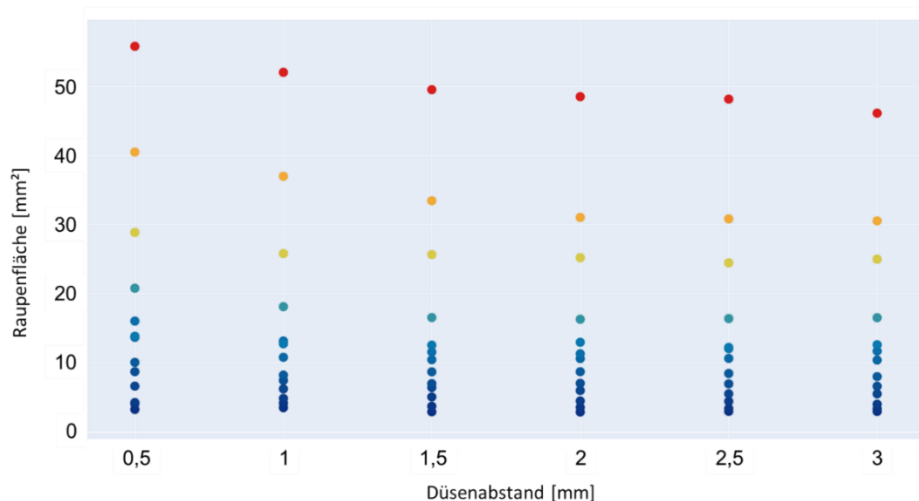


Abbildung 4-40: Nichtlinearitäten in der Raupenfläche bei gleichbleibender normierter Motordrehzahl

Die Nichtlinearitäten, welche aus der Abbildung 4-39 hervorgehen und in Abbildung 4-40 noch einmal deutlicher zu sehen sind, begründen sich durch einen systematischen Fehler bei der Drehzahlreglung. Durch geringe Düsenabstände wird die Kunststoffapplikation erschwert und der Druck im Innern des Extruders wird erhöht. Um die Motordrehzahl konstant zu halten, wird die Leistungsaufnahme des Motors erhöht, bis der Druck abgebaut wurde. Dadurch schwankt die Motordrehzahl. Die Vermutung wird dadurch untermauert, dass dieses Phänomen vor allem bei hohen normierten Motordrehzahlen [Rot (5 U/mm), Orange (3,3 U/mm) und hellgrün (2,5 U/mm)] zu erkennen ist. Der genaue Zusammenhang konnte aufgrund fehlender Druck-Sensorik im Extruder nicht weiter untersucht werden.

Dennoch lassen sich sowohl die Raupenhöhe, als auch die Raupenbreite anhand des Düsenabstandes und der normierten Motordrehzahl mit einem quadratischen Modell vorhersagen. Das Modell wurde mit einem Düsendurchmesser von 1 mm und dem Material PP aufgestellt (siehe Abbildung 4-41). Experimente mit weiteren Kunststoffen (ABS und PC) haben jedoch gezeigt, dass sich das Modell einfach übertragen lässt.

Außerdem wurden 3D-Druckversuche mit einem weiteren Düsendurchmesser (3 mm) durchgeführt, um eine Übertragbarkeit hinsichtlich des Düsendurchmessers zu zeigen. Folgende Gleichungen wurden für die aufgespannten Ebenen in Abbildung 4-41 ermittelt.

$$h(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 \quad (\text{Gl. 5.1})$$

$$p_{00} = 0.2788$$

$$p_{10} = 0.0007226$$

$$p_{01} = 0.2409$$

$$p_{20} = -2.511e - 08$$

$$p_{02} = 0.1008$$

$$p_{11} = -0.0001025$$

$$R^2: 0.97$$

$$b(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 \quad (\text{Gl. 5.2.})$$

$$p_{00} = 7.973$$

$$p_{10} = 0.004725$$

$$p_{01} = -4.005$$

$$p_{20} = -4.71e - 07$$

$$p_{02} = 0.399$$

$$p_{11} = 0.0001356$$

$$R^2: 0.98$$

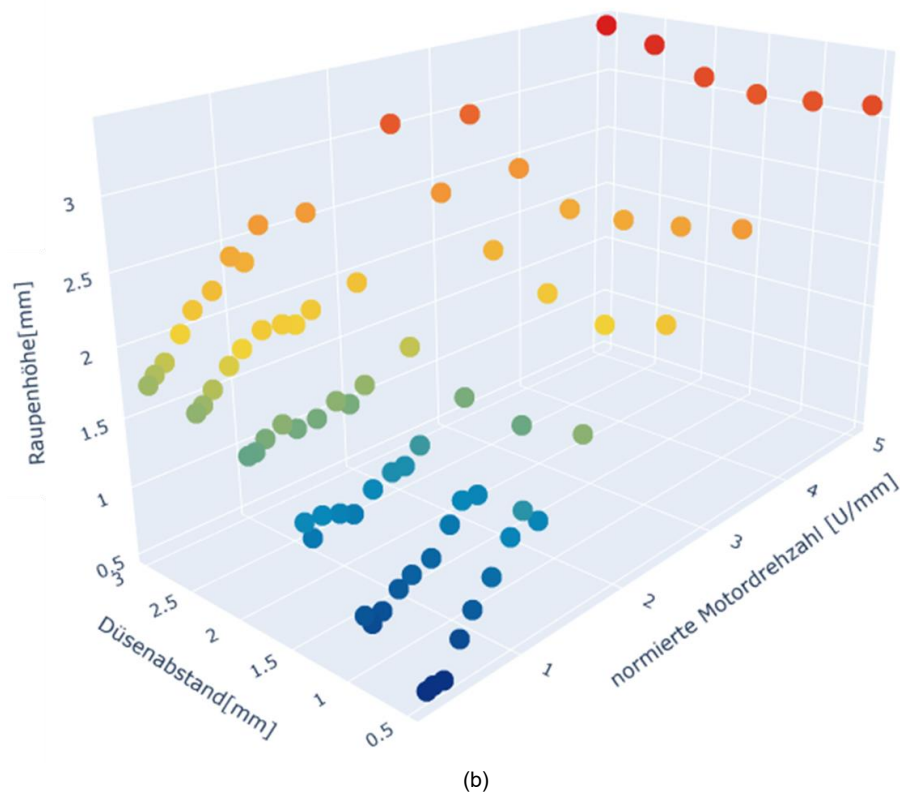
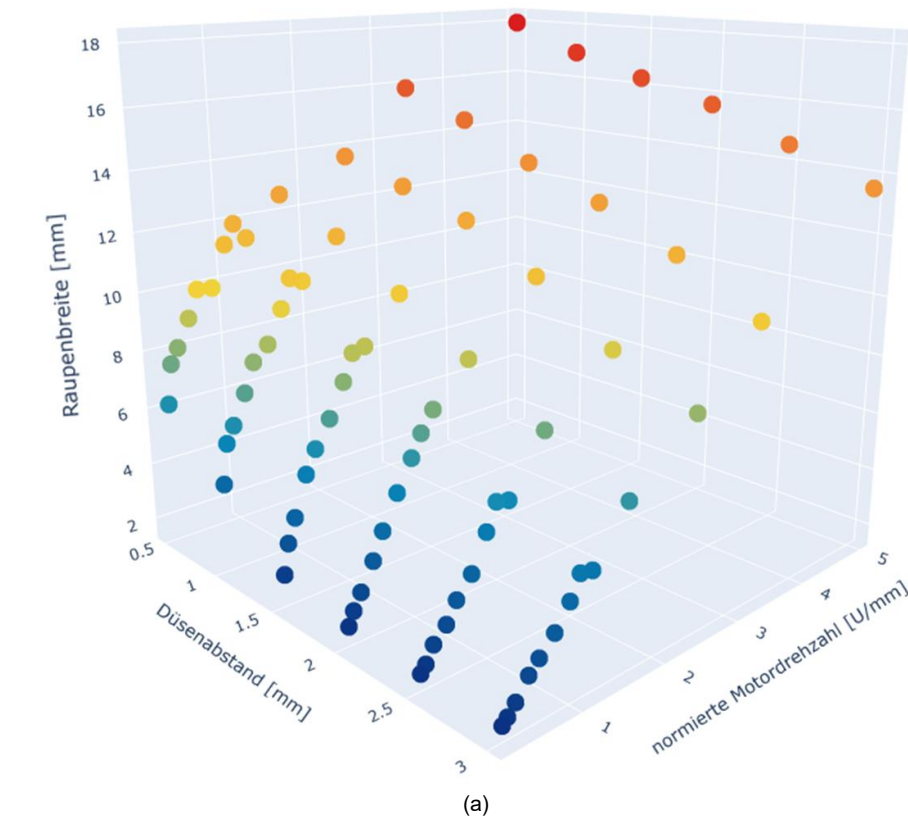


Abbildung 4-41: Einfluss der normierten Motordrehzahl auf (a) die Raupenbreite und (b) die Raupenhöhe ©IWF

Untersuchung der Raupenform und Überlappung von Bahnen

Neben Untersuchungen zur Raupenbreite und Schichthöhe wurde außerdem die Überlappung einzelner Raupen mit dem Ziel betrachtet Vollbauteile zuverlässig zu drucken. Dabei wurden experimentelle Untersuchungen zwischen geringen Überlappungen von 5% der Raupenbreite bis großen Überlappungen von bis zu 30% durchgeführt. Das Problem bei zu geringer Überlappung waren Löcher und Hohlräume im Bauteil (siehe Abbildung 4-43a). Bei zu großer Überlappung kam es zu einem Materialstau und damit zu einer undefinierten Ablage der Bahnen (Überextrusion). Wurde beispielsweise zu viel Material auf einer Stelle extrudiert, drückte es sich entweder zur Seite oder nach oben weg, wodurch die Außenkontur des gedruckten Bauteils beeinträchtigt wurde. Bei Versuchen hat sich gezeigt, dass eine optimale Überlappung von der Form der Raupe und damit von der extrudierten Kunststoffmenge abhängig ist.

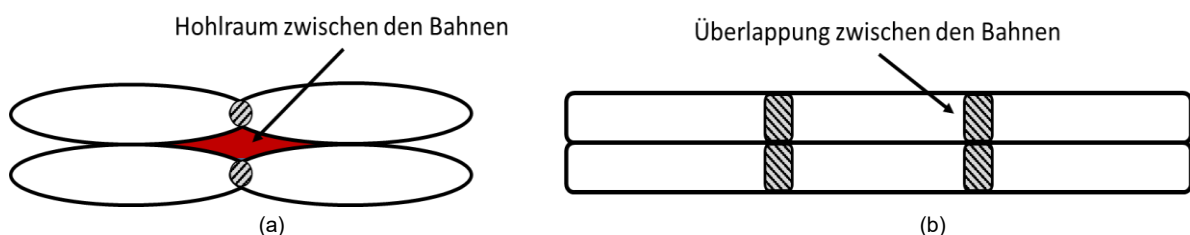


Abbildung 4-42: Unterschiede der Kunststoffraupenform und damit einhergehende Hohlräume, (a) elliptische Kunststoffraupen, (b) rechteckige Kunststoffraupen

Ein hoher Düsenabstand bei gleichzeitig geringer normierter Motordrehzahl führt zu einer ovalen Raupenform. Diese Formen benötigen Überlappungen von bis zu 30 % der Raupenbreite, um eine Spaltbildung zwischen den Bahnen zu vermeiden. Die benötigte Überlappung ruft jedoch eine Vergrößerung der eigentlichen Schichthöhe der Bahnen hervor und beeinflusst so den Druck in nachfolgenden Schichten negativ. Bei Düsenabständen bis 2 mm und mittleren normierten Motordrehzahlen zwischen 2 U/mm und 3,5 U/mm bildeten sich rechteckige Raupenformen aus, die sich aufgrund ihrer vorteilhaften Form bereits bei geringen Überlappungen von 0,5 mm nahtlos aneinanderfügen ließen. Dennoch sollten Überlappungen von mindestens 0,5 mm verwendet werden, um die Unstetigkeit des Volumenstroms des Extruders ausgleichen zu können (siehe Abbildung 4-43).



Abbildung 4-43: Überlappung von rechteckigen Bahnen mit (a) keiner Überlappung und (b) einer Überlappung von 0,5 mm ©IWF

Einfluss der Druckrichtungen und der Neigung auf die Verbundhaftung

Im weiteren Projektverlauf wurden die Druckrichtung relativ zur Strukturierungsrichtung und der Anstellwinkel des Extruders betrachtet. Für die Prozesslandkarte zum Andruckprozess an vorstrukturierte Flächen wurden folgende Parameter in Bezug auf die Druckrichtung und den Anstellwinkel des Extruders untersucht:

Tabelle 4-9: Parameter zur Optimierung der Verbundhaftung zwischen Metallstrukturen und Oberfläche

Parameter	Wertebereich			
Druckrichtung	0° (parallel)	45° (diagonal)	90° (orthogonal)	180° (parallel)
Anstellwinkel des Extruders	90°		60°	

Die Versuche wurden mit vorgeheizten Probenblechen (140°C) und einer Robotergeschwindigkeit von 10 mm/s für die erste Schicht durchgeführt. Die Raupenbreite wurde auf 5 mm festgelegt, da die Strukturen mit einem seitlichen Abstand von 5 mm auf den Blechen aufgebracht wurden. Beim Bedrucken der Probenkörper wurde darauf geachtet, dass die applizierte Kunststofffläche über den Probenrand hinausreicht. Im Anschluss wurden die bedruckten Probenkörper nach DIN 1465 zugeschnitten. Als Schichthöhe wurde 2 mm gewählt, damit die Probenhöhe von 6 mm beim Zuschneiden zuverlässig erreicht werden konnte. Die zugehörige normierte Fördermenge wurde mit Hilfe der Gleichungen 5-1 und 5-2 bestimmt. Zur Beschleunigung des 3D-Druckprozesses wurde basierend auf dem im vorherigen Abschnitt „Untersuchung der Raupenbreite und Schichthöhe“ aufgestellten Modell eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit bei gleichbleibender Raupenbreite und Schichthöhe durchgeführt.

Zunächst werden die Ergebnisse zur Variation der Druckrichtung vorgestellt. Je nach Druckrichtung variiert der Füllgrad der Strukturhinterschnitte und damit die maximal mögliche Haftung zwischen Metallgrundkörper und Kunststoff (siehe Abbildung 4-44).

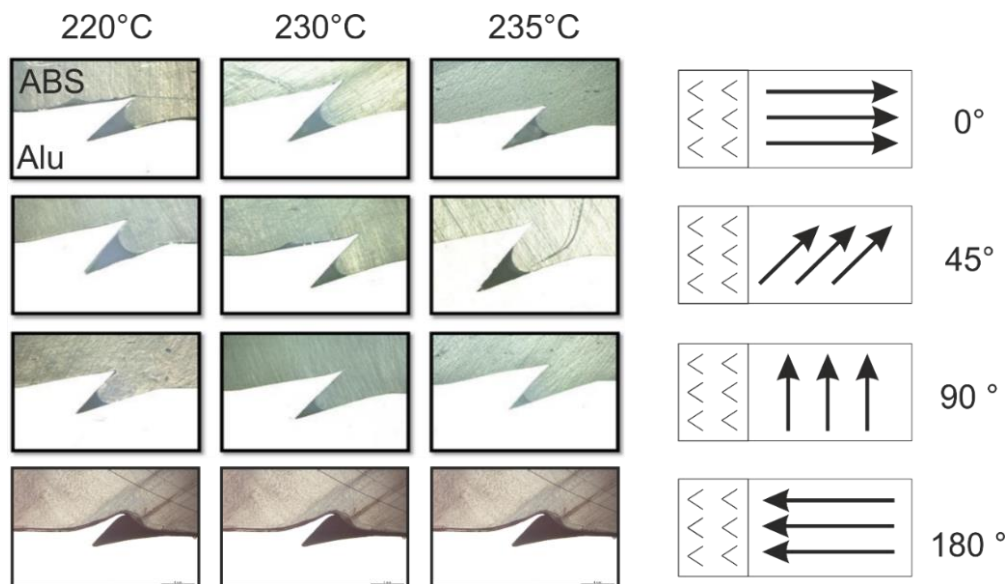


Abbildung 4-44: Querschliffe der untersuchten Druckrichtungen bei Drucktemperaturen von 220°C bis 235°C ©IWF

Die Güte der Verklammerung lässt sich weiterhin durch die Extrusionstemperatur und damit über die Viskosität des Kunststoffs beeinflussen. Je niederviskoser der Kunststoff, bzw. je höher die Verarbeitungstemperatur, desto besser werden die Kavitäten der Verklammerungsstrukturen gefüllt. Folgende Ergebnisse wurden bei den verschiedenen Druckrichtungen erzielt: Die Druckrichtung 90° zur Struktur erzielte Festigkeiten von $57,4 \pm 3,7$ MPa, 45° erzielte eine Festigkeit von $58,4 \pm 5,1$ MPa und 0° erzielte

$50,1 \pm 2,3$. Die Festigkeiten wurden auf die projizierten Flächen A_{PX} aller aufgetragenen Strukturen bezogen. Bei einem Kunststoffauftrag in 180° Orientierung zur eingebrachten Verklammerungsstruktur tritt kein Verklammerungseffekt auf, da der Kunststoff nicht in die Kavitäten eindringen kann. Die so erzeugten Proben erreichten in Scherzugversuchen lediglich geringe Haftfestigkeiten unterhalb von 10 MPa oder versagten bereits vor der eigentlichen Prüfung. Folglich ist schon bei der Festlegung der Strukturbahnen eine günstige Druckstrategie festzulegen.

Auch der Anstellwinkel des Extruders relativ zur Oberfläche der Struktur hat einen Einfluss auf das Füllverhalten der Strukturkavitäten und damit auf die Haftung. Entgegen der Vermutung, dass eine verbesserte Haftung durch das Neigen des Extruders in Richtung der Kavität der Struktur erreicht werden kann, verringert sich der Füllgrad der Strukturen und damit die Verbundfestigkeit (siehe Abbildung 4-45). Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist ein Druckabfall im Extruder, welcher durch das Anstellen hervorgerufen wird. Infolgedessen wird der Kunststoff über die Struktur hinweg gedrückt und gelangt nicht in die Kavität.

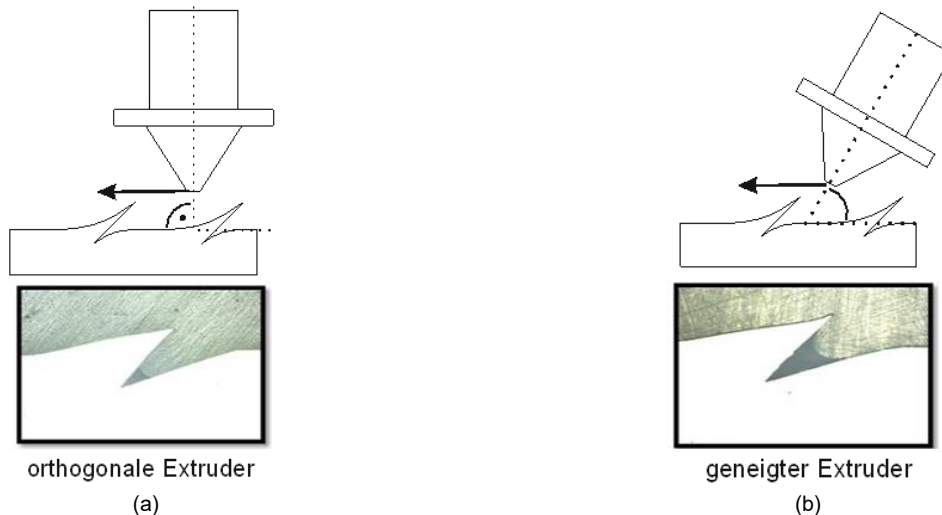


Abbildung 4-45: Füllgrad der Struktur bei (a) orthogonalem und (b) geneigtem 3D-Druck ©IWF

Durch einen zu großen Anstellwinkel des Extruders erhöht sich zudem das Risiko einer Kollision mit dem metallischen Basisbauteil und den bereits applizierten Kunststoffschichten. Darüber hinaus begünstigt das Neigen des Extruders eine Unterbrechung der Granulatzufuhr, die als lose Schüttung in einem Fülltrichter vorliegt. Die mit geneigtem Extruder erreichte Verbundfestigkeit liegt mit $37,9 \pm 9,6$ MPa einerseits im Mittelwert weit unter den erreichten Festigkeiten bei orthogonaler Orientierung des Extruders zur Oberfläche, andererseits liegt auch die Varianz weit über dem Vergleichswert als bei vertikal ausgerichteter Extruder. Es wird daher empfohlen den Extruder orthogonal zu den Oberflächenstrukturen zu führen, um maximale Haftzugfestigkeiten zu erreichen.

Finale Darstellung der Prozesskarte für den Druck auf strukturierte Metalloberflächen

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel wurde ein Prozessfenster für den extruderbasierten 3D-Druck auf Verklammerungsstrukturen (AlMg3) ausgearbeitet und in Tabelle 4-10 zusammengefasst. Die Parameter beziehen sich dabei auf den 3D-Druck mit ABS. Für weitere Kunststoff-Metallverbindungen ergeben sich materialbedingt andere Parameter. Diese müssen in Folgeprojekten untersucht werden. Jedoch lassen sich folgende allgemeine Aussage treffen:

- Für eine optimale Haftung auf den Verklammerungsstrukturen sollte die Viskosität des Kunststoffs (für die ersten Kunststoffschichten) so hoch wie möglich sein (hoher Füllgrad).
- Der Kunststoffauftrag der ersten Schicht auf den Verklammerungsstrukturen sollte mit geringen Verfahrgeschwindigkeiten und mit hoher Flächenpressung durchgeführt werden; Dafür sollte der Düsenabstand möglichst gering eingestellt werden.
- Der Extruder sollte orthogonal zur strukturierten Oberfläche ausgerichtet sein.
- Der strukturierte Metallgrundkörper ist vorzuheizen, um die Fließfähigkeit der Kunststoffschmelze bei Kontakt mit der Metalloberfläche nicht herabzusetzen.

Tabelle 4-10: Prozessparameter für den extruderbasierten Kunststoffauftrag von ABS auf strukturierten Metalloberflächen

Parameter	Minimalwert	Maximalwert	Bemerkung
Extrusionstemperatur	210°C	230°C	Höhere Temperaturen werden empfohlen
Heizbetttemperatur	120°C	150°C	Höhere Temperaturen werden empfohlen
Düsenabstand	Erste Schicht: Strukturhöhe Rest: 2 mm	Erste Schicht: 1,5 mm Rest: 2,5 mm	Abstand bei erster Schicht sollte so gering wie möglich sein, damit die Strukturen maximal gefüllt werden
Robotergeschwindigkeit	0,01 m/s	0,05 m/s	Für erste Schicht so gering wie möglich
Motordrehzahl	500 U/min	1500 U/min	Abhängig von Robotergeschwindigkeit
Schichthöhe	1 mm	2,5 mm	Abhängig von Robotergeschwindigkeit und Fördermenge
Raupenbreite	3 mm	10 mm	Abhängig von Robotergeschwindigkeit und Fördermenge
Überlappung der Bahn	0,5 mm	2 mm	Abhängig von der Raupenbreite, um Spaltbildung zwischen den Raupen zu vermeiden
Druckrichtung	0	90°	Eine Druckrichtung von 90° zur Orientierung der Verklammerungsstrukturen wird empfohlen

4.4 In-Prozess Spanerfassung und Prozessregelung

In den nachfolgenden Arbeiten erfolgte die spanende Nachbearbeitung der additiv aufgebauten Strukturen auf metallischen Halbzeugen durch Fräsen. Dabei lag der Schwerpunkt zunächst auf der Entwicklung einer Absaughaube, mit der die im Zuge des Fräsprozesses angefallenen Metall- und Kunststoffspäne abgesaugt und aus dem Arbeitsraum entfernt werden können. Anschließend wurden Zerspanversuche durchgeführt, um für den Zerspanprozess mit Roboter geeignete Einstellparameter zu erarbeiten. Darüber hinaus wurde eine Prozessregelung aufgebaut, mit der während des Zerspanprozesses die Einstellparameter in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffs angepasst werden können.

4.4.1 In-Prozess Spanerfassung

Entwicklung der Absaughaube - Anforderungsanalyse

Begonnen wurden die Arbeiten mit der Konzeption, Konstruktion und dem Aufbau einer Absaughaube für die vollständige Erfassung der während der Zerspanung anfallenden Metall- und Kunststoffspäne. Für die Auslegung wurde in Abstimmung mit den Konsortialpartnern eine Anforderungsliste erstellt, in der alle Randbedingungen für die Konstruktion zusammengefasst sind (siehe Anhang Tabelle 8-2).

Entwicklung der Absaughaube – Morphologischer Kasten

Zur Erfüllung der konstruktiven Anforderungen wurde ein morphologischer Kasten (Auszug in Abbildung 4-46) erstellt. In diesem ist die Gesamtanforderung der Absaughaube in unterschiedliche Teilaufgaben, wie z.B. die Energieübertragung für die Bewegung der Haube oder die Ankopplung der Absaugung an den Roboterarm beschrieben. Für die insgesamt 17 Teilanforderungen wurden jeweils bis zu fünf Lösungsmöglichkeiten erarbeitet.

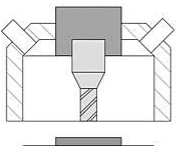
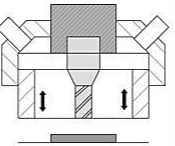
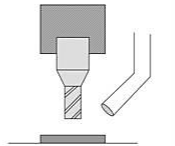
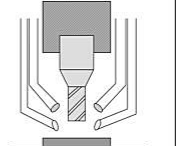
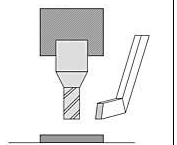
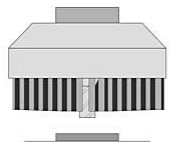
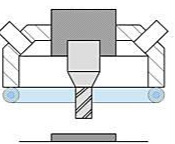
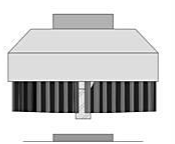
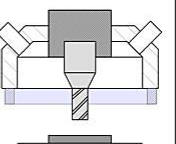
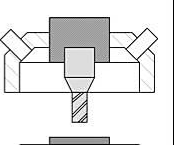
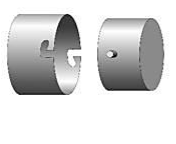
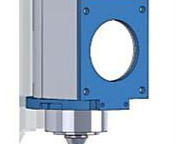

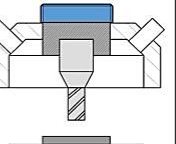
Konzept	Lösung 01	Lösung 02	Lösung 03	Lösung 04	Lösung 05
Absaugprinzip					
	Haube starr	Haube flexibel	Rohr (1x)	Rohre (4x)	"Kanal" (Spalt)
Absaughaube					
	Lamellen	formflexibler Ring	Bürsten	Formkissen	keine
Ankopplung an Roboterarm	an Spindelkasten	an Roboterflansch/ durch Adapterplatte	an Roboterarm		
Befestigung des Absaugsystems	dauerhafte Befestigung am Roboter	von Hand montierbar	von Roboterarm montierbar (Roboter holt sich Haube von selbst)		
Montage des Absaugsystems an Roboter					
	Schnellspannsystem (Bajonettverschluss)	feste Installation an Adapterplatte (Verschraubung)	Druckknopf (Pin mit Federmechanismus)	Verschraubung (Gewinde an Absaughaube und in Adapterplatte)	

Abbildung 4-46: Auszug aus dem morphologischen Kasten für die Absaughaube

Aus den einzelnen Teillösungen des morphologischen Kastens wurden die geeignetsten Konzepte miteinander kombiniert und insgesamt drei Gesamtkonzepte für die Absaugung zusammengestellt. Diese wurden nach einem Zehn-Punkte-Schema mit vordefinierten Kriterien bewertet, um eine objektive Beurteilung der Lösungen zu gewährleisten. Das Konzept mit der höchsten Punktzahl wurde anschließend vollständig im 3D-CAD-Programm SolidWorks konstruiert. Das Gesamtkonzept besteht aus insgesamt elf Einzelteilen, die in vier Teilsysteme (Spindeladapter, Schließmechanismus, Absaughaube und Aktorik) unterteilt werden.

Die Absaughaube arbeitet nach dem Prallplattenprinzip, wie es auch in Holzbearbeitungsmaschinen eingesetzt wird (siehe Abschnitt 2.4). Dabei wird die kinetische Energie der während der Zerspaltung entstehenden Späne verringert, indem diese auf eine Aufprallfläche treffen, infolge schlagartig abgebremst und anschließend energieeffizient direkt in Werkzeugnähe abgesaugt werden können.

In der ersten Konstruktionsversion war es vorgesehen die Absaughaube durch drei Hydraulikzylinder während des Zerspanprozesses zu bewegen. Diese Lösung wurde jedoch im Laufe der Projektbearbeitung aufgrund der hohen Komplexität und der Vielzahl an zusätzlichen Komponenten (Hubzylinder, Ventile, Druckregler, Pumpen, Elektromotor, Öltank) sowie des geringen Verfahrenswegs von maximal 70 mm verworfen. Für die finale Version der Absaughaube (Abbildung 4-47) wurden stattdessen drei Elektrozyylinder eingesetzt. Diese werden von Schrittmotoren angetrieben, welche direkt durch die Steuerung der Fertigungszelle angesteuert werden können. Somit kann die Haube vollautomatisch während der Zerspaltung angestellt und um einen Stellweg von bis zu 200 mm bewegt werden. Dadurch können die Späne auch beim Fräsen von komplexen 3D-Konturen erfasst werden.

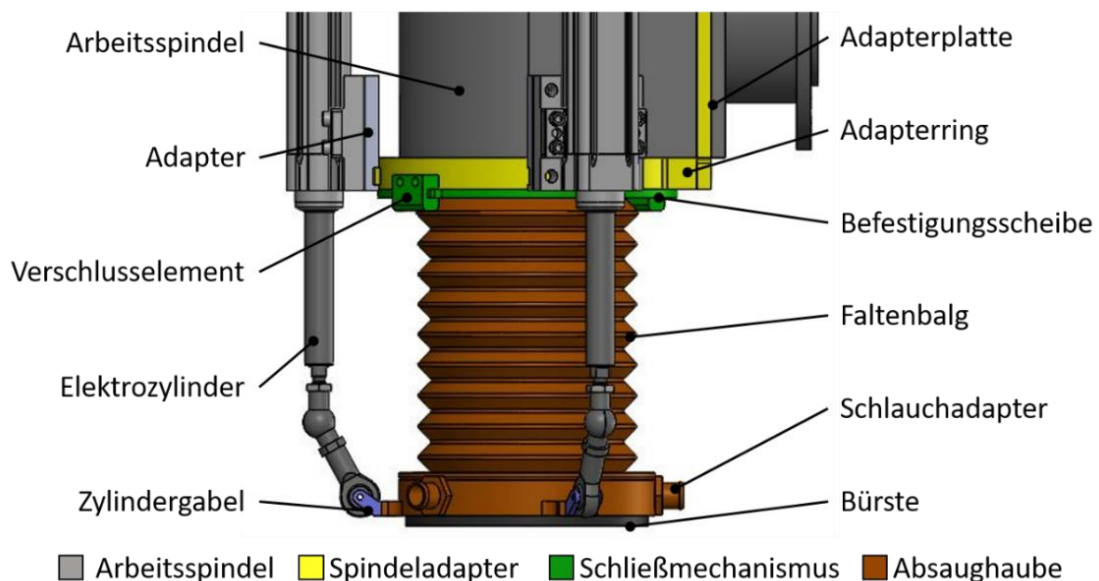


Abbildung 4-47: Finale Konstruktion der Absaughaube ©IWF

Die Absaughaube besteht aus den folgenden Einzelkomponenten und Teilsystemen:

Spindeladapter

Das erste Teilsystem ist der Spindeladapter, welcher aus einer Adapterplatte und einem Adapterring besteht. Die Adapterplatte wird am Flansch zwischen der Arbeitsspindel sowie dem Roboterarm verschraubt und ist rechtwinklig mit dem Adapterring verbunden. Durch einen kreisförmigen Querschnitt wird dieser konzentrisch zur Arbeitsspindel angeordnet. An der Außenseite des Ringes sind drei, um 110° versetzt, Aufsätze eingearbeitet die zur Befestigung der Elektrozyylinder dienen.

Schließmechanismus

Die Absaughaube ist durch einen Schließmechanismus mit dem Spindeladapter verbunden. Dieser besteht aus zwei Verschlusselementen, die an den Adapterring verschraubt werden, einer Befestigungsscheibe an die ein Faltenbalg verschraubt wird und einem Steckbolzen zur Sicherung der Verbindung.

Absaughaube

Das dritte Teilsystem besteht aus einem flexiblen Faltenbalg und einem starren Ringelement an der die Absaugung der Späne erfolgt. Der Faltenbalg ist durch einen Flansch mit den Befestigungsringen verbunden und ermöglicht die Verbindung zwischen Absaughaube und dem Schließmechanismus.

Der Absaugring stellt den starren Bereich des Teilsystems dar. Auf der Mantelfläche des Rings sind drei Ausschnitte vorgesehen, in denen Schlauchadapter befestigt werden. An diesen wird jeweils ein Absaugschlauch befestigt, der die Bewegung des Roboters während der Zerspanung ohne Einschränkung gewährleistet. Über einen 3D-gedruckten Adapter werden die einzelnen Absaugschläuche mit der Zentralabsaugung des IML verbunden. Analog zum Adapterring sind an der Mantelfläche drei Aufsätze zur Befestigung der Elektrozyylinder enthalten. Diese werden durch jeweils eine Zylindergabel mit einer Gelenkmutter und einer Wellenkupplung mit dem Absaugring verbunden. Auf der Unterseite des Absaugrings ist ein Bürstenring befestigt, wodurch die Absaughaube flexibel am Bauteil anliegen kann. Der Bürstenring ermöglicht während der Absaugung eine Luftzufuhr in das System und verhindert ein Festsaugen der Haube auf einer planen Oberfläche.

Elektrozyylinder

Das vierte Teilsystem besteht aus Hubzylindern und deren Befestigung (Adapter) im Gesamtsystem. Dafür wurden drei Elektrozyylinder vom Typ ESBF-BS-32-200-5P der Firma Festo beschafft. Diese werden von einem Schrittmotor vom Typ EMMS-ST-42-SEB-G2 angetrieben. Dabei wird die Drehbewegung des Schrittmotors durch einen Axialbausatz (Typ EAMM-A-D32-42A-S1) in eine Linearbewegung der Kolbenstange umgewandelt. Durch das Ansteuern der Elektrozyylinder ist sowohl eine reine Hubbewegung, als auch ein Neigen der Haube um einen Winkel bis zu 30° möglich. Durch die Steuerungssoftware des Roboters ist die Ansteuerung einzelner oder die simultane Ansteuerung mehrerer Zylinder möglich. Damit ein Neigen der Absaughaube in jede beliebige Richtung ermöglicht wird, sind Zylindergabeln drehbar am Absaugring befestigt.

Nach der vollständigen Auskonstruktion wurden die Einzelkomponenten am IWF gefertigt, die Haube an einem Industrieroboter vom Typ Kuka KR300 montiert (Abbildung 4-48) und an die Zentralabsaugung des IML angeschlossen.

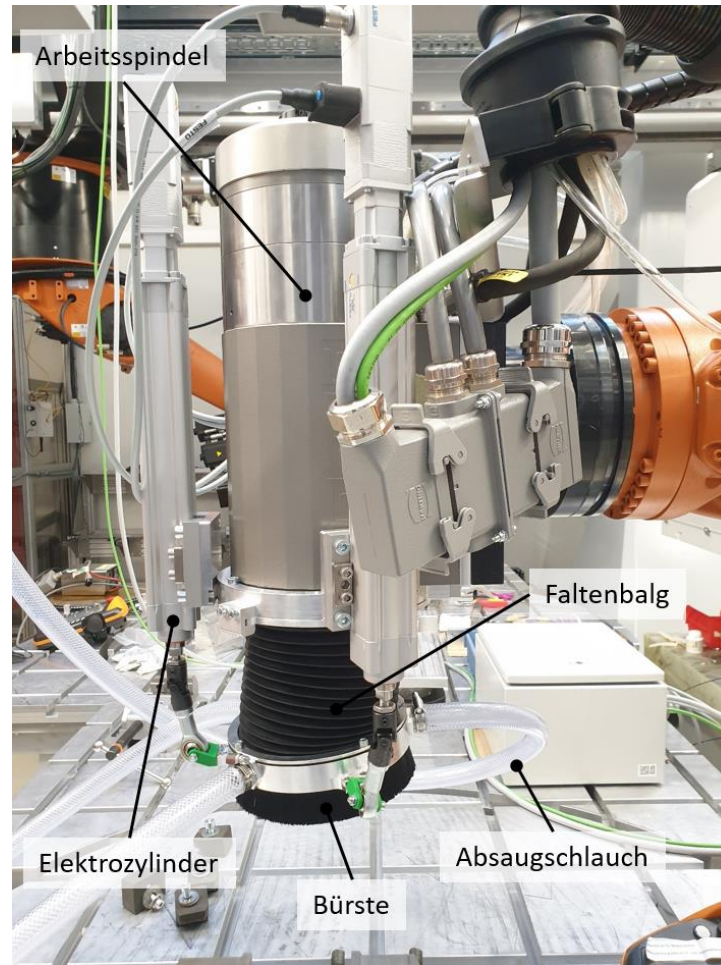


Abbildung 4-48: Am Roboter aufgebaute Absaughaube ©IWF

Basierend auf den Ergebnissen des IWFs und gemeinsamen Diskussionen der Projektpartner wurde von der Fa. robot-machining ein erweiterter Prototyp entwickelt. Dieser zeichnet sich durch vier einzeln ansteuerbare Segmenten aus, welche über vergleichbare Elektrosteller bewegt werden können. Die Absaugung nutzt genau wie die Absaugung des IWF das Prallplattenprinzip. Die Absaugung der Späne erfolgt jedoch durch das Gehäuse der Absaugung an der Frässpindel vorbei. Dadurch wird Platz eingespart und eine einfache Führung der Schlauchpakete für die Absaugung ermöglicht. Die Absaugung ist in Abbildung 4-49 zu sehen.

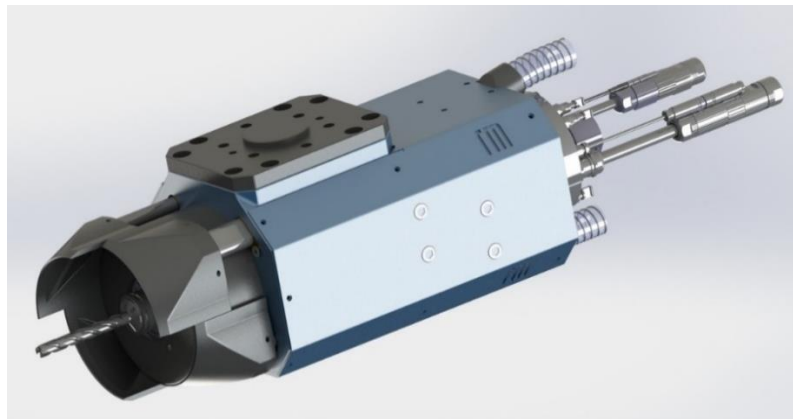


Abbildung 4-49: Integrierte Absaugung der Fa. robot-machining ©rm

Experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung der Absaughaube

Begonnen wurde mit der Messung der auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten. Dazu wurde ein Universal Klimamessgerät vom Typ „Testo 400“ der Firma Testo mit einer Flügelradsonde eingesetzt. Die Messungen erfolgten an zwei Stellen innerhalb der Absaughaube. Der erste Messpunkt befindet sich an der Öffnung des Absaugstutzens, der zweite Messpunkt ist unmittelbar an der Werkzeugeinspannung. Gemessen wurde aus Sicherheitsgründen bei stillstehendem Werkzeug.

Obwohl die Messpunkte lediglich 75 mm auseinanderliegen, ergeben sich deutliche Unterschiede in den auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten. Am ersten Messpunkt wurde direkt an den Absaugstutzen eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $v_{MP1} = 25,4$ m/s gemessen. Am Werkzeug wird eine Geschwindigkeit von $v_{MP2} = 1,4$ m/s erzielt. Zur Ermittlung des mit der Absaughaube erreichbaren Spanerfassungsgrades wurden Zerspanversuche an einem Hybridwerkstoff aus Aluminium und ABS sowie an dessen Einzelkomponenten durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden die Werkstoffe sowohl an den Kanten besäumt (entspricht einem Schlichtprozess), als auch Vollnuten gefräst (entspricht einem Schruppprozess).

Zur Bestimmung des Spanerfassungsgrades wurde für jeden Versuch das zerspante Volumen sowie die zerspante Masse aus den Einstellparametern und der Dichte der einzelnen Werkstoffe berechnet. Alle nicht durch die Absaughaube erfassten Späne wurden anschließend zusammengetragen und mit einer Feinmesswaage gewogen. Das dabei erfasste Gewicht wurde abschließend vom berechneten zerspannten Volumen subtrahiert und daraus der Spanerfassungsgrad der Absaughaube berechnet.

Bei den Untersuchungen wurde der Anstellwinkel sowie die Höhe der Absaughaube systematisch variiert, um daraus die optimale Anstellposition der Haube für die Zerspanung zu ermitteln. Dazu wurden insgesamt fünf verschiedene Positionen untersucht. Begonnen wurde mit der horizontalen Anstellung der Haube (0°) auf Werkstückhöhe. Dabei ragt der Fräser 10 mm aus der Absaughaube heraus. In der zweiten Position wurde die Absaughaube horizontal (0°) auf die Auskraglänge des Fräasers angestellt. Abschließend wurde die Haube um 15° sowie um 30° zu der zu bearbeitenden Oberfläche geneigt. Bei dem Nutfräsprozess wurde die Absaughaube auf Werkstückhöhe eingestellt. Eine Staubmessung wurde im Laufe der Untersuchungen nicht durchgeführt, da es sich bei den Werkstoffen um gegossenes, faserloses Material handelt, wodurch während der Zerspanung kein Staub entsteht der abgesaugt werden muss. Die Ergebnisse zum ermittelnden Spanerfassungsgrad sind in Abbildung 4-50 dargestellt.

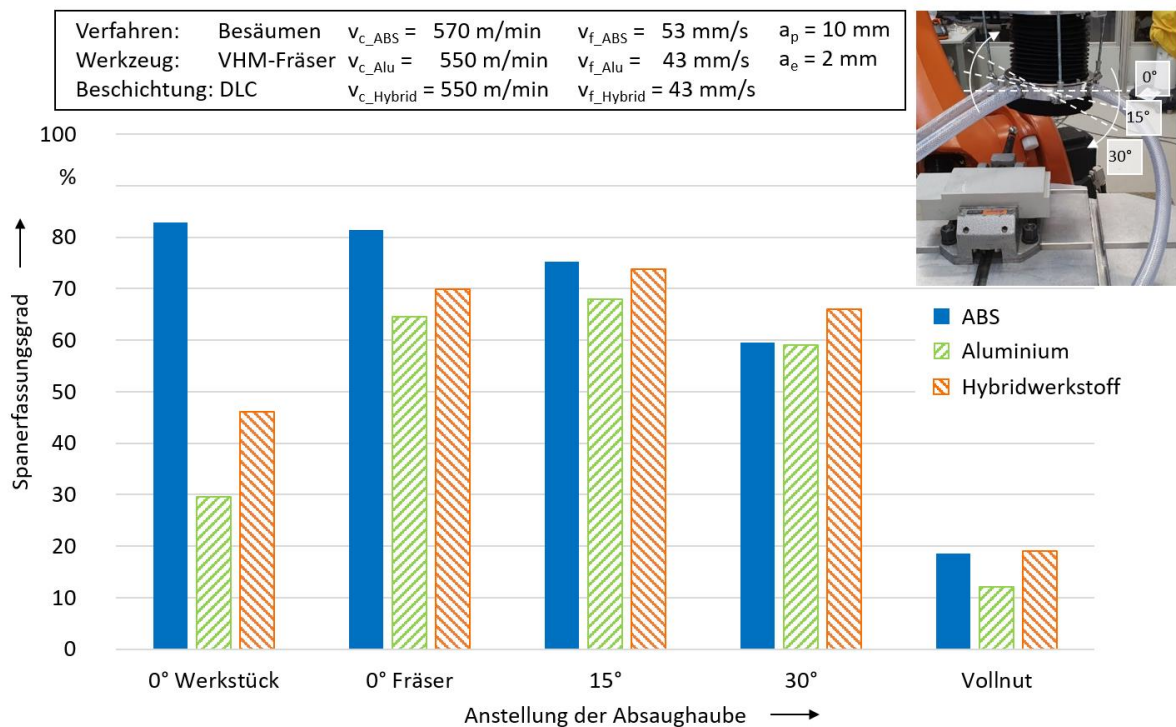


Abbildung 4-50: Ergebnisse zur Ermittlung des Spanerfassungsgrads

Die Untersuchungen ergeben, dass mit der Absaughaube im Durchschnitt zwischen 60% (30° Anstellwinkel der Haube) und 82% (0° Anstellwinkel der Haube und Bürstspitzen auf Werkstückhöhe) der ABS-Späne beim Besäumen erfasst werden können. Im Vergleich dazu liegt der Erfassungsgrad der Aluminiumspäne zwischen 60% (30° Anstellwinkel der Haube) und 68% (0° Anstellwinkel der Haube und Bürstspitzen auf Werkzeughöhe). Eine Abweichung liegt lediglich bei der Haubenanstellung auf Werkstückhöhe vor. Dort werden über 80% der ABS-Späne, jedoch lediglich 30% der Aluminiumspäne erfasst. Das Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass bei der Anstellung der Absaughaube die Späne nicht vollständig auf das Ringelement treffen. Somit werden die, im Vergleich zum ABS schwereren Aluminiumspäne nicht vollständig durch die Haube abgebremst und können nicht durch den Absaugstrom erfasst werden. Bei der Zerspanung des Hybridwerkstoffs werden ähnlich gute Ergebnisse wie bei den Einzelkomponenten erzielt. So liegt der Spanerfassungsgrad zwischen 65% und 72%, je nach Anstellung der Absaughaube.

Beim Vollnutfräsen wurden im Durchschnitt 19% der entstandenen Späne im ABS und im Hybridwerkstoff sowie 12% der Aluminiumspäne erfasst. Dies ist auf das größere Zeitspanvolumen beim Vollnutfräsen zurückzuführen. Dadurch, dass der Fräser voll im Eingriff ist entsteht ein größerer Spanquerschnitt und damit einhergehend eine höhere Masse der Späne. Beim Vollnutfräsen kann die Haube nur bis auf die Werkstückhöhe angestellt werden. Somit treffen die Späne hauptsächlich auf das Bürstenelement anstatt auf den Ring der Absaughaube. Durch ihre hohe kinetische Energie sind die Späne in der Lage das Bürstenelement zu durchschlagen, wodurch diese nicht mehr von der Absaugung erfasst werden können. Durch Bürsten aus einem widerstandsfähigerem Material könnte der Spanerfassungsgrad erhöht werden. Diese wären jedoch weniger nachgiebig und könnten die erzeugte Werkstückoberfläche beeinflussen.

Trotz des geringeren Spanerfassungsgrades beim Vollnutfräsen ist der Einsatz einer Absaughaube während der Zerspanung in der Roboterzelle sinnvoll. Die Haube verhindert, dass die entstehenden

Späne unkontrolliert in der Fertigungszelle verteilt werden (Abbildung 4-51). Somit bleiben die Späne in unmittelbarer Nähe der Zerspanstelle und können in Nachgang deutlich einfacher entfernt werden.

Mit dem Funktionsdemonstrator der Absaughaube konnte die technische Leistungsfähigkeit des Absaugsystems nachgewiesen werden. Das System wurde vollständig aufgebaut und in die Steuerung des IML integriert, sodass die Absaughaube während der Zerspanung vollautomatisch bewegt und angestellt werden kann.

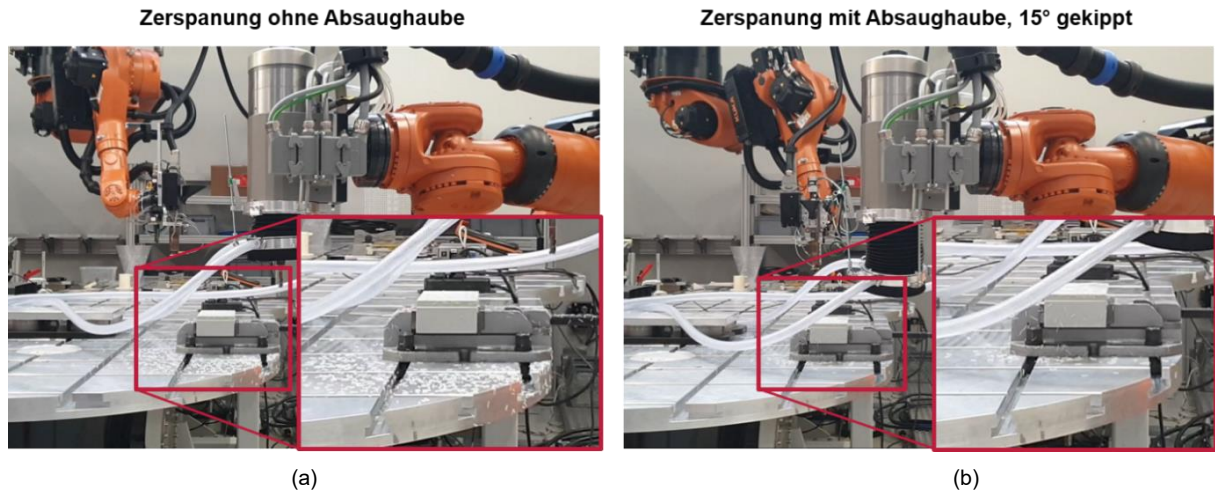


Abbildung 4-51: Vergleich der Zerspanung (a) ohne Absaughaube und (b) mit Absaughaube

Ansteuerung der Absaughaube inklusive Kollisionsüberwachung

Damit die Absaughaube bei der Fräsbearbeitung auch bei Volumenkörper und Freiformflächen problemlos eingesetzt werden kann, muss eine Kollisionsüberwachung in die Bahnplanung der Werkzeugwege integriert werden. Da eine flexible, im Prozess steuerbare Absaughaube nicht Stand der Technik ist, kann nicht auf bestehende Funktionen aus Mastercam oder Robotmaster zurückgegriffen werden. Daher muss ein neuer Algorithmus entwickelt werden, der die erzeugten Werkzeugwege auf Kollision zwischen Bauteil und Absaughaube überprüft. Wie in der CAM-Branche üblich, soll diese Erkennung über die 3D-Daten der Komponenten als STL-Model erfolgen.

Bei der Entwicklung eines Algorithmus zur Kollisionskontrolle bestehen grundsätzlich mehrere Ansätze, die in unterschiedlichen Programmiersprachen umgesetzt werden können. Letztendlich wurde sich für die Programmiersprache C++ entschieden, da diese Sprache folgende Vorteile bietet:

- Maschinennah, somit sehr performant und schnell.
- Die Mastercam API ist in C++ geschrieben. Daher können die entwickelten Algorithmen leicht in diese implementiert werden.

Die Kollisionskontrolle wird mithilfe der „Brute-Force“-Methode durchgeführt. Während des Fertigungsprozesses wird nach Schnittpunkten zwischen der Geometrie der Absaughaube und der Geometrie des Werkstücks gesucht. Die einzelnen Dateien liegen gemäß dem Stand der Technik im STL-Format vor. STL-Dateien bilden eine beliebige Geometrie mit unterschiedlich großen Dreiecken nach (siehe Abbildung 4-52 – rechts). Folglich muss lediglich nach Schnittpunkten von Dreiecken gesucht werden, um Kollisionen zu erkennen. Eine mögliche Kollision von Absaughaube (lila) und Werkstück (rot) ist in Abbildung 4-52 - links zu erkennen.

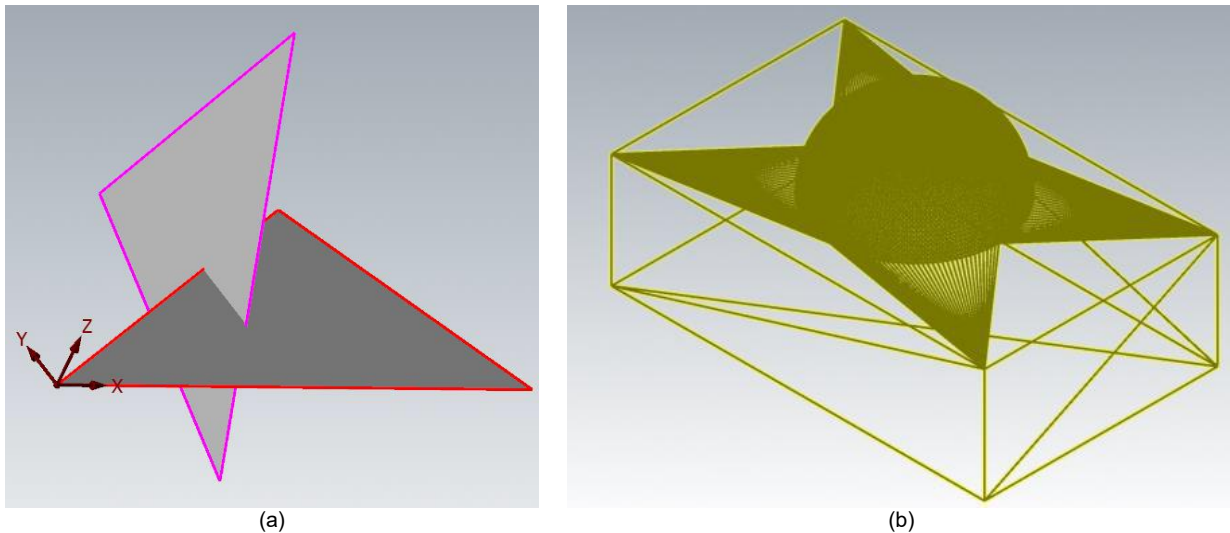


Abbildung 4-52: Kollisionsüberwachung auf Basis der Brute-Force-Methode mit (a) Berechnung von Schnittpunkten der STL-Dreiecke der Absaugung (lila) und des Werkstücks (rot) und (b) Beispielgeometrie im STL-Format ©robotized

Wird eine Kollision detektiert, so muss die Absaughaube in eine andere Position gebracht werden. Dazu werden die Elektrosteller in eine neue Position gefahren. Durch die Anordnung, der in Abbildung 4-47 dargestellten Elektrosteller kann sowohl eine Translation, als auch eine Rotation zum Umoorientieren genutzt werden. Nach der Verschiebung der Absaughaube wird die Position der Elektrosteller gespeichert und eine erneute Kollisionsprüfung durchgeführt. Findet keine Kollision statt, kann der nächste Punkt überprüft werden. Im Prinzip laufen so zwei kombinierte Abfragen iterativ ab. Nach dem Einstellen einer Startposition der Absaughaube wird für den ersten Punkt des Werkzeugwegs eine Kollisionsprüfung zwischen Bauteil und Absaughaube durchgeführt. Findet eine Kollision statt, so wird die Haube umorientiert und die Kollisionsprüfung erneut durchgeführt. Findet keine Kollision statt, so wird der nächste Punkt überprüft.

Der Algorithmus ist in seiner Grundform lauffähig, muss zur Serienreife allerdings noch weiter geprüft und verbessert werden. Durch die „Brute-Force“ Methode, mit der alle Dreiecke des Referenzmodells mit allen Dreiecken des Vergleichsmodells geprüft werden, ist der Algorithmus besonders bei größeren STL Modellen (>1MB) sehr langsam. Eine Verbesserung der Performance könnte dadurch erreicht werden, dass im Vorfeld eine vereinfachte Begrenzungsbox der Modelle geprüft wird, und nur bei einer Kollision dieser Boxen eine genaue Berechnung der detaillierten Daten stattfindet.

4.4.2 Werkstoffadaptive Prozessregelung

Für den Aufbau einer werkstoffangepassten Prozessregelung wurden Zerspanversuche für Aluminium (EN AW-5083), ABS und dem Verbund aus beiden durchgeführt. Die Prozessparameter wurden hinsichtlich Schnittgeschwindigkeit und Vorschub vollfaktoriell variiert. Damit sollen, im Hinblick auf die erreichbare Oberflächenqualität der herzustellenden Realbauteile (siehe Kapitel 4.6), sinnvolle Einstellparameter für das Fräsen mit Robotern erarbeitet werden. Begonnen wurde mit der Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Messung der entstandenen Oberflächen. Die Schnittgeschwindigkeit mit der die beste Oberflächenqualität erreicht wurde diente als Grundlage für die Variation der Vorschubgeschwindigkeit. Am Ende der Zerspanversuche steht jeweils eine Parameterkombination, mit der die besten Oberflächengüten in Aluminium und in ABS erreicht werden konnten. Diese wurden anschließend an dem Hybridwerkstoff getestet.

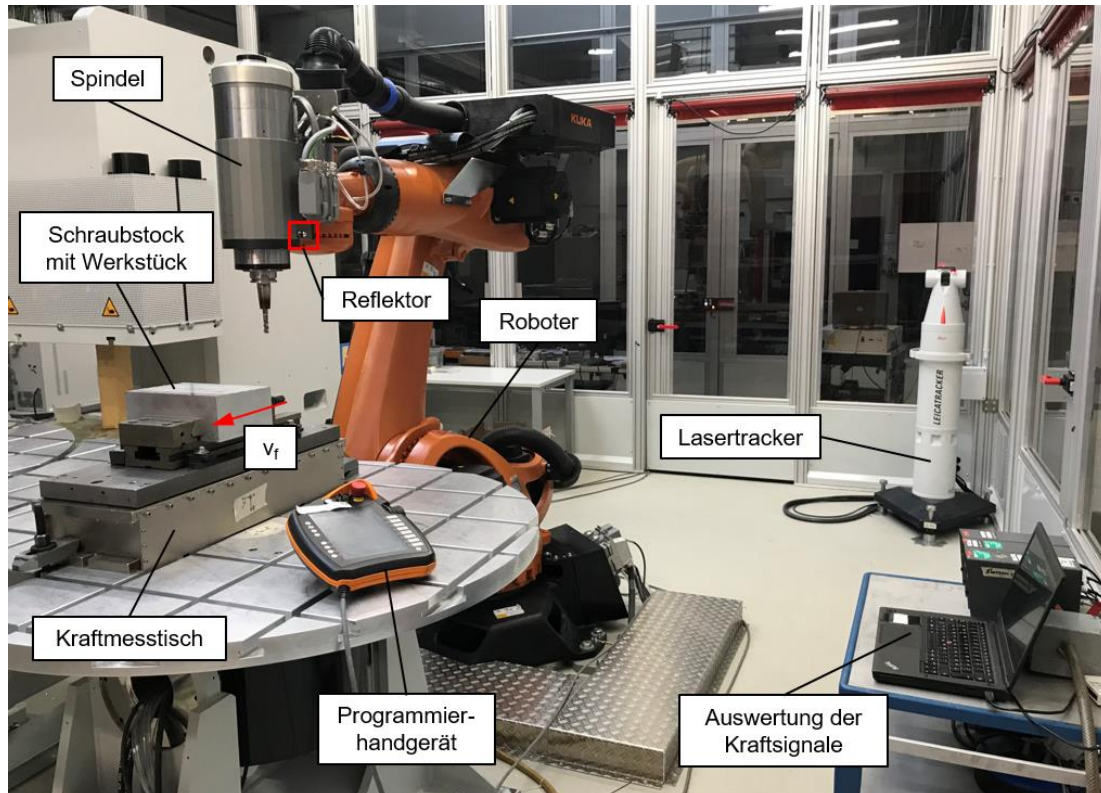


Abbildung 4-53: Versuchsaufbau für die Fräsversuche ©IWF

Für den Aufbau und die Entwicklung einer werkstoffangepassten Prozessregelung wurde die Versuchsanlage mit entsprechender Messtechnik ausgestattet (Abbildung 4-53). Somit können während und nach dem Bearbeitungsprozess die folgenden Messdaten aufgezeichnet werden:

- Zerspankraft in X-, Y-, und Z-Richtung durch einen Kraftmesstisch
- Leistung der Werkzeugspindel durch ein Leistungsmessgerät
- Position/ Geschwindigkeit der Arbeitsspindel durch einen Lasertracker
- Qualität der zerspannten Oberflächen (R_a , R_z , R_{max}) durch ein Rauheitsmessgerät

Die Messdaten zur Kraft- und Leistungsmessung wurden durch die Software LabView erfasst. Daten zur Position und Geschwindigkeit der Werkzeugspindel wurden separat durch die Software des Lasertrackers aufgenommen. Zur Bestimmung der Oberflächenkennwerte (R_a , R_z , R_{max}) wird ein Rauheitsmessgerät vom Typ *Hommel Tester T1000* eingesetzt. Bei den Messungen wird jeweils der Mittelwert aus fünf Messstellen am Werkstück gebildet. Die Messrichtung entspricht der Vorschubrichtung des Roboters (Abbildung 4-54).

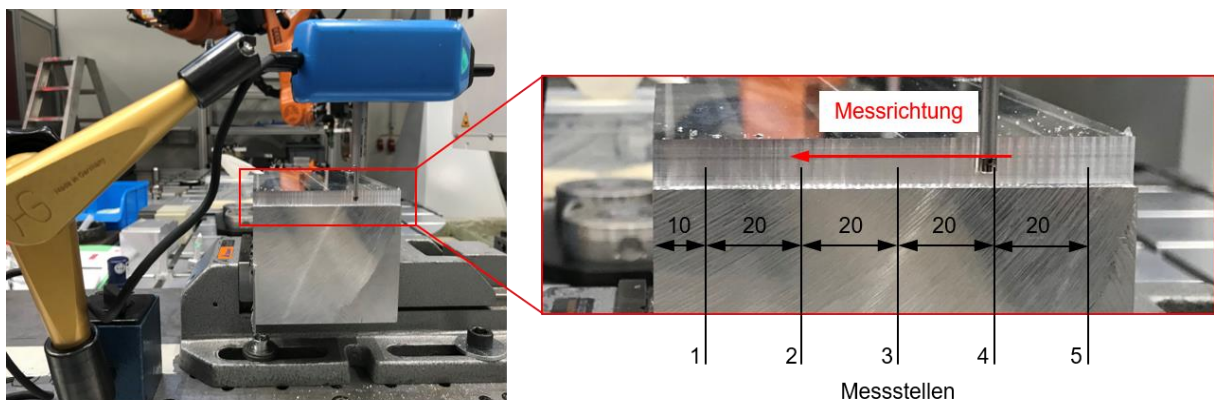


Abbildung 4-54: Messaufbau Rauheitsmessungen ©IWF

Zerspanung von Aluminium

Begonnen wurde in Aluminium mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 500$ m/min und einem Vorschub von $v_f = 30$ mm/s, da mit diesen Einstellparametern im Rahmen von Vorversuchen bereits Oberflächengüten von $R_z \leq 2 \mu\text{m}$ erzeugt wurden. Die Variation der Schnittgeschwindigkeit zeigt bis zu einem Wert von $v_c = 600$ m/min eine leichte Abnahme der Rauheitskennwerte mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit (Abbildung 4-55). So wurde ein Minimum von $R_z = 2,05 \mu\text{m}$ bei $v_c = 600$ m/min gemessen. Bei einer Steigerung der Schnittgeschwindigkeit kommt es zu keiner weiteren Reduzierung der gemessenen Oberflächenrauheiten. Bei den zugehörigen Kraftmessungen wird ein Wert in Y-Richtung (orthogonal zur Vorschubrichtung in Achsrichtung des Fräasers) von bis zu 500 N erreicht. Mit Schnittgeschwindigkeiten über $v_c = 600$ m/min kommt es zu einer großen Streubreite der Messwerte, sodass die systematischen und statistischen Fehler einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis nehmen. Die nächst geringere Oberflächenrauheit ($R_z = 2,44 \mu\text{m}$) wird mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 570$ m/min erreicht. Diese wurde, aufgrund der geringeren Streubreite der Kraftmesswerte, für die Variation der Vorschubgeschwindigkeit verwendet.

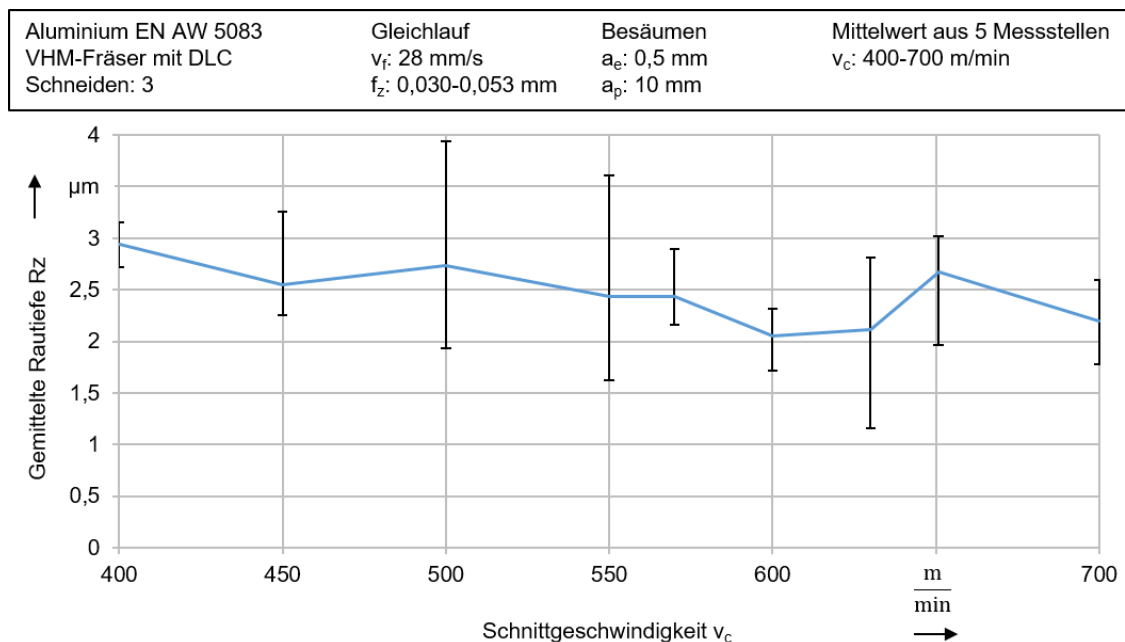


Abbildung 4-55: Rauheitsmessungen für Aluminium bei Variation der Schnittgeschwindigkeit

Im nächsten Schritt erfolgte die systematische Variation der Vorschubgeschwindigkeit zwischen $v_f = 23$ mm/s und 48 mm/s sowie die Messung der zugehörigen Rauheitskennwerte (Abbildung 4-56). Aus den Messergebnissen zeichnet sich ein konstantes Verhalten der Rautiefe ab. Die geringste gemessene Rautiefe betrug $R_z = 1,87 \mu\text{m}$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 43$ mm/s.

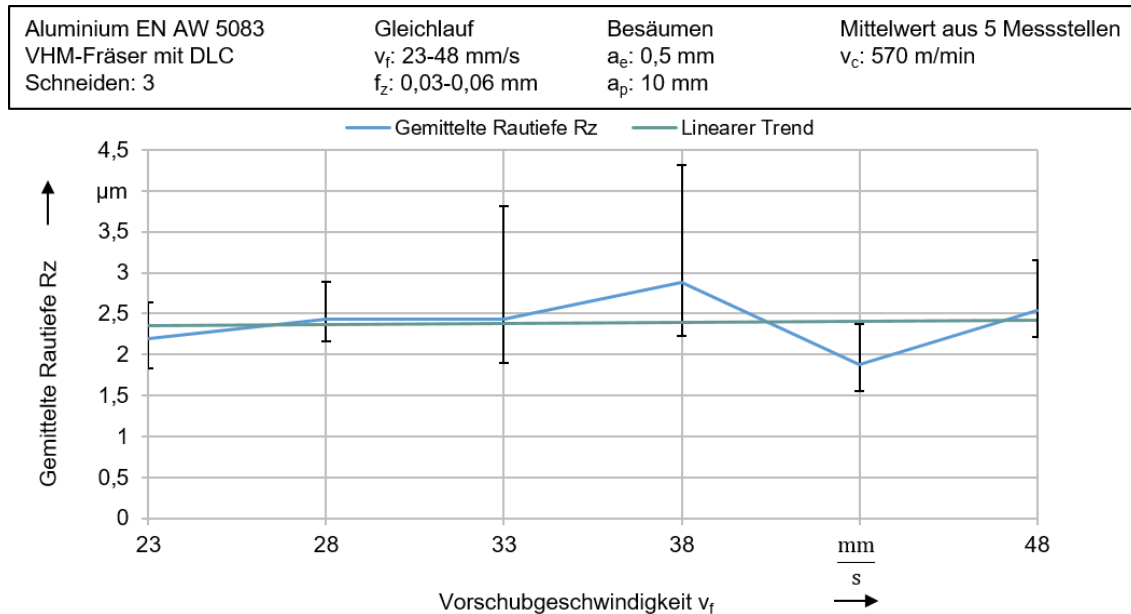


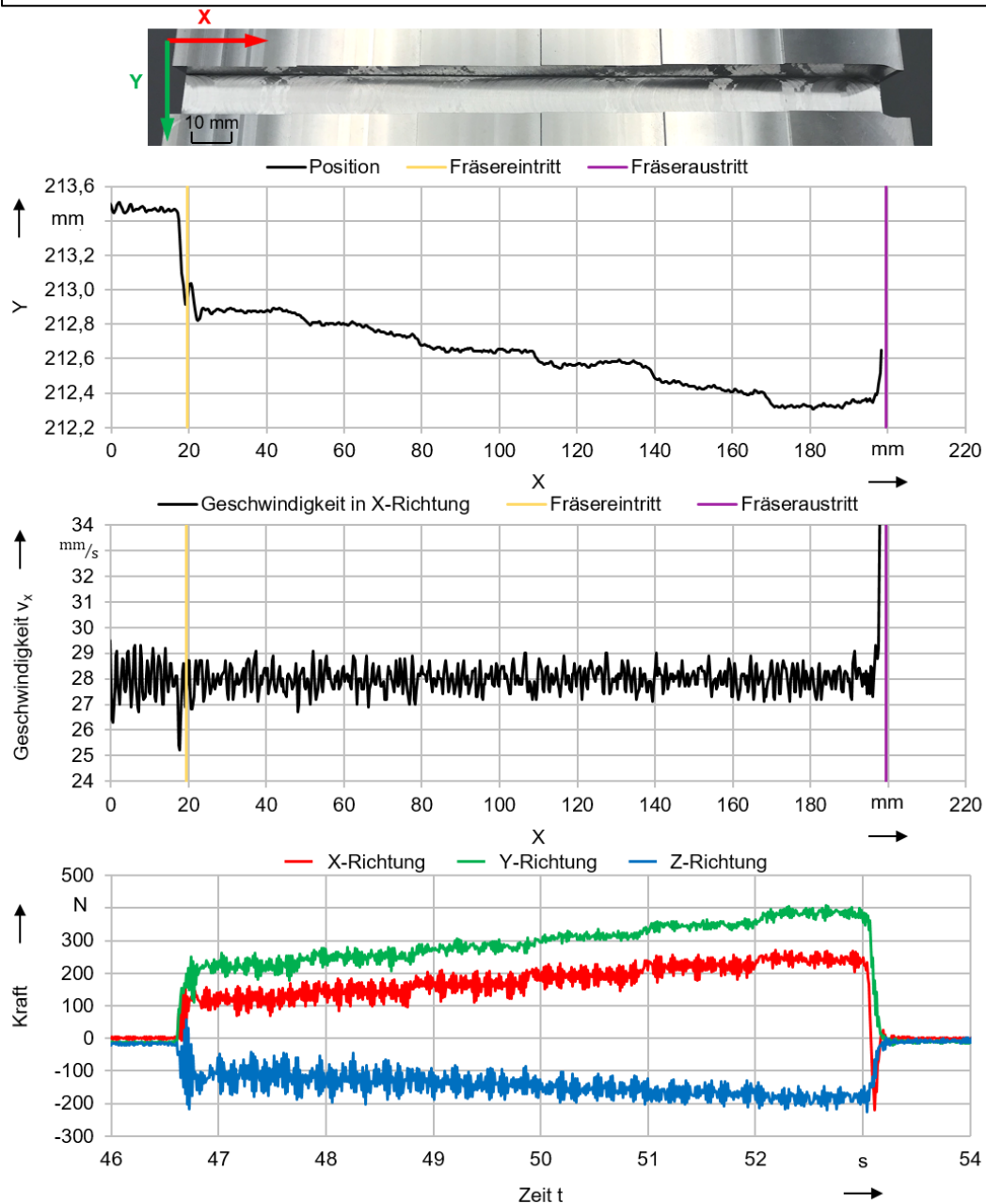
Abbildung 4-56: Rauheitsmessungen für Aluminium bei Variation des Vorschubs

Im Rahmen des Vollnutfräsens erfolgten Untersuchungen zur Ermittlung der maximalen Zustelltiefe. Damit soll eine Prozessgrenze gefunden werden, bis zu der mit dem eingesetzten KUKA KR300-Roboter sicher zerspant werden kann. Dazu wurden Treppenstufen in das Aluminium eingefräst, sodass die Zustelltiefe nach definierten Abständen von 20 mm um jeweils 1 mm zunimmt. Die erste Versuchsreihe untersuchte eine Schnitttiefe zwischen $a_p = 1$ und $a_p = 6$ mm. Als Einstellparameter wurden die beim Besäumen ermittelten Werte für v_c und v_f verwendet. Ab einer Schnitttiefe von $a_p = 5$ mm trat starkes Rattern in Form von Schwingungen auf, wodurch mit dem Roboter eine unregelmäßige Nutoberfläche erzeugt wurde. Die Rattermarken treten in Form von starken Riefen und Unebenheiten sowohl am Nutgrund als auch an den Flanken auf. Die Zerspankräfte stiegen sprunghaft mit Beginn der Schwingungen um ein Vielfaches an und erreichten in Vorschubrichtung (X-Richtung) Werte von über 1.000 N. Die eingestellte Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 43$ mm/s ist daher lediglich bis zu einer Schnitttiefe von $a_p = 4$ mm geeignet und stellt damit die erste Prozessgrenze dar.

Durch weitere Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass mit Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit beim Vollnutfräsen auf $v_f = 28$ mm/s Schwingungen (und damit das Rattern) verhindert werden können. Somit konnten die Untersuchungen zur Ermittlung der Grenzschnitttiefe bis zu einer maximalen Schnitttiefe von $a_p = 12$ mm durchgeführt werden, die dem Werkzeugdurchmesser entspricht.

In der Versuchsreihe mit stufenweiser Steigerung der Schnitttiefe beim Vollnutfräsen zwischen $a_p = 7$ mm und $a_p = 12$ mm zeigte sich durch die Positionsmessung, dass unmittelbar beim Werkzeugeintritt eine Abdrängung des Fräasers um 0,6 mm auftritt. Dies steigerte sich bei jeder zusätzlichen Stufe, wodurch das Werkzeug bei $a_p = 12$ mm um 1,14 mm von der programmierten Bahn abgedrängt wurde (Abbildung 4-57).

Aluminium EN AW 5083	v_c : 570 m/min	Nut	Messfrequenz: 100 Hz
VHM-Fräser, DLC Beschichtung	v_f : 28 mm/s	a_e : 12 mm	
Schneiden: 3	f_z : 0,038 mm	a_p : 7-12 mm	je 30 mm in X: a_p + 1 mm

Abbildung 4-57: Ergebnisse Vollnutfräsen mit $a_p = 7$ bis 12 mm

Insgesamt verzeichnet sich der Trend, dass mit jedem Millimeter zusätzlicher Schnitttiefe eine Abdrängung von 0,1 mm orthogonal zur Vorschubrichtung auftritt. Die Auswertung der zugehörigen Roboter-geschwindigkeit zeigen lediglich eine Abweichung von $\pm 3\%$ vom eingestellten Sollwert. Demnach hängen die Geschwindigkeitsschwankungen nicht unmittelbar von den Einstellparametern ab. Hinsichtlich der Kraftmessungen wird ein Anstieg der Aktivkraft um 30 bis 50 N je zusätzlicher Stufe gemessen, während die auftretenden Schwingungen am Werkzeug mit jedem Millimeter Schnitttiefe verringert werden.

Die Untersuchungen zeigten, dass für das Vollnutfräsen (und damit der Schruppbearbeitung) mit dem verwendeten Roboter die folgenden Einstellparameter in Aluminium verwendet werden können:

- $v_{c_Al} = 570$ m/min, $v_{f_Al} = 28$ mm/s, $a_{p_Al} = 12$ mm ($Q = 242$ cm³/min)

Zerspanung von ABS

Nach den Untersuchungen am Aluminium wurde das Vorgehen für die Zerspanung des Kunststoffs ABS wiederholt. Da die gemittelten Rautiefen bei der Zerspanung des Aluminiums mit Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit eine leichte Abnahme zeigten, wurden auch hier die Schnittgeschwindigkeiten bis auf $v_c = 600$ m/min erhöht.

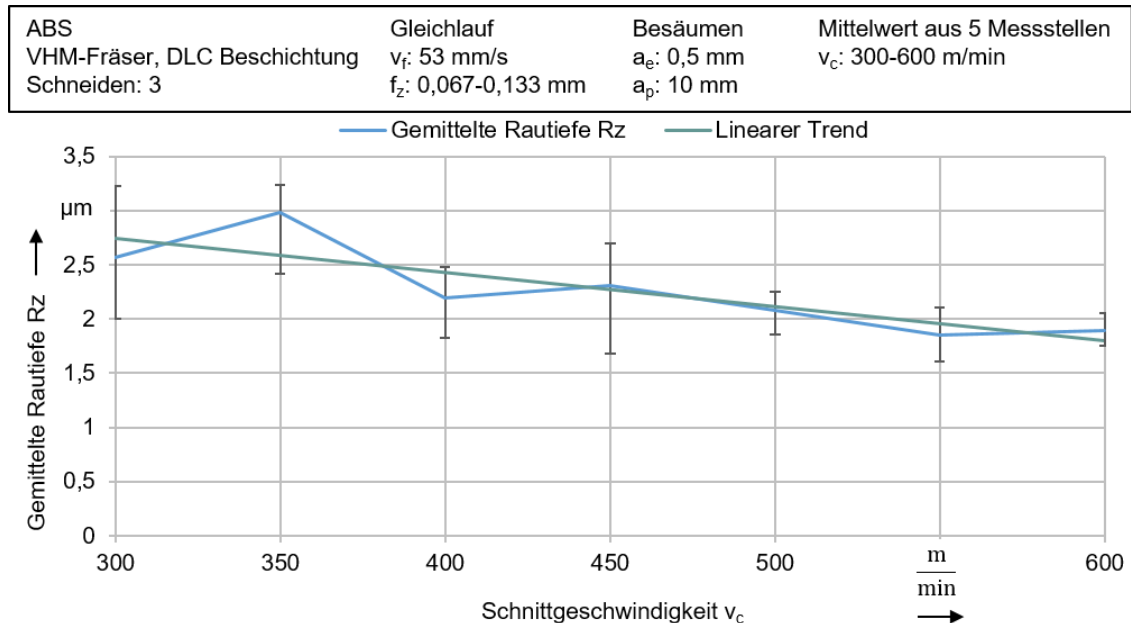


Abbildung 4-58: Ergebnisse Rauheitsmessungen in Aluminium bei Variation des Vorschubs

Der geringste Wert der gemittelten Rautiefe wird mit $R_z = 1,85 \mu\text{m}$ bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 550$ m/min erreicht (Abbildung 4-58). Dabei ist auffällig, dass die Streubreiten der Messwerte insgesamt kleiner sind als bei den Versuchen zum Aluminium (vgl. Abbildung 4-56). Ein weiterer Unterschied im Vergleich zur Zerspanung des Aluminiums besteht im Verhalten der Späne. Die Kunststoffspäne haften durch ihre elektrostatische Aufladung zum Teil an Roboter, Spindel, Werkstück und Schraubstock (Abbildung 4-59). Diese können jedoch durch die Absaugung entfernt werden.



Abbildung 4-59: Spananhaftungen beim Fräsen von ABS ©IWF

Die Auswertung der Positionsmessung zeigt eine Abdrängung orthogonal zur Vorschubrichtung von bis zu 0,12 mm beim Fräseintritt (Abbildung 4-60). Diese tritt jedoch, im Vergleich zum Aluminium, nicht sprunghaft auf. Wie auch beim Aluminium traten Geschwindigkeitsschwankungen zwischen $\pm 2,45\%$ auf, was die Annahme stützt, dass die Abweichung auf die Regelung des Roboters zurückzuführen ist. Somit ist die Ursache nicht auf den Einfluss des Werkstoffs, zumindest im Eingriff bei eingeschwungenem Zustand, zurückzuführen. Wie erwartet, sind die gemessenen Zerspankräfte deutlich geringer als bei der Zerspanung des Aluminiums.

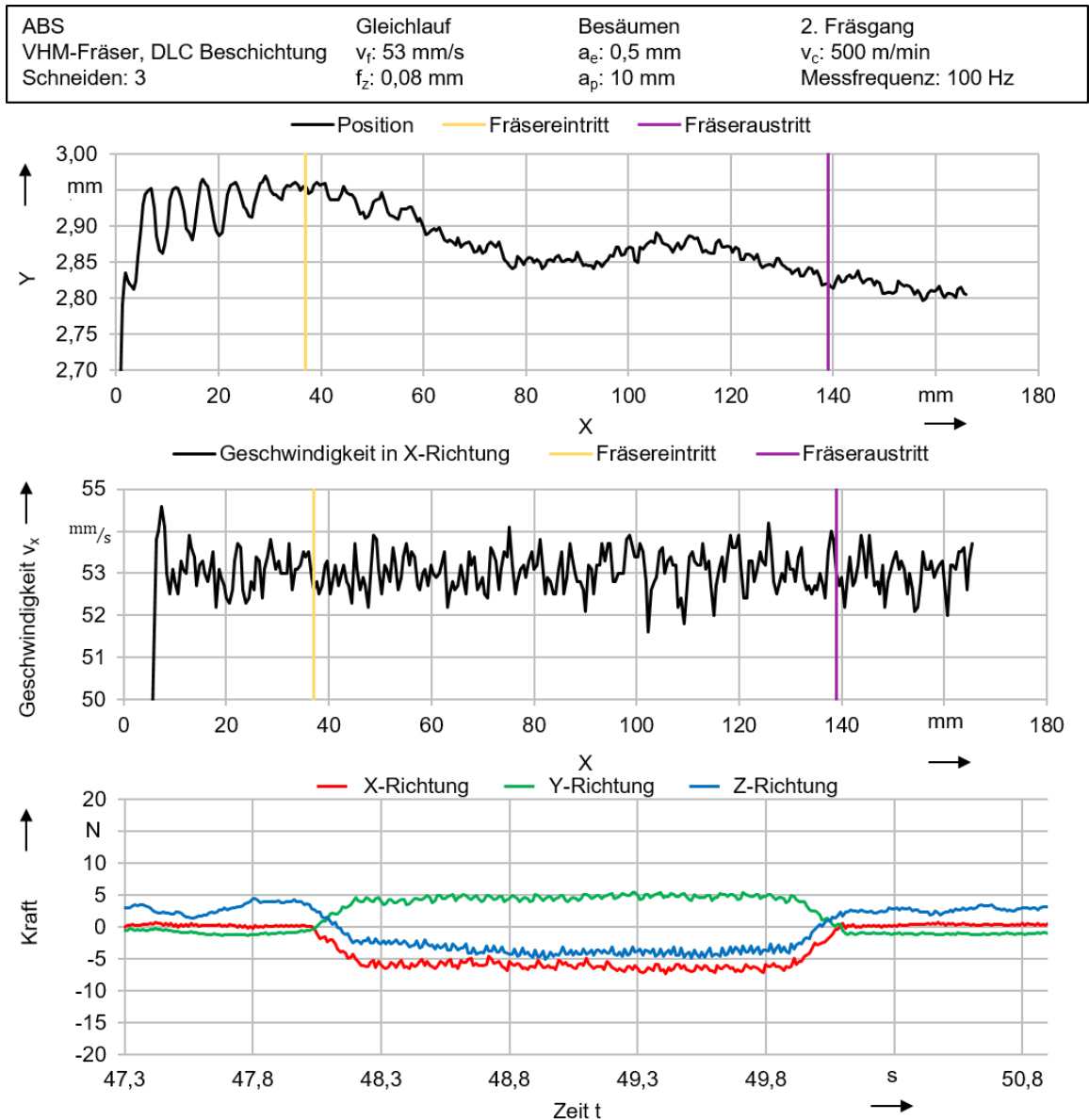


Abbildung 4-60: Ergebnisse Kraft-, Geschwindigkeit- und Positionsmessung am ABS

Da die geringsten Rauheitskennwerte bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 550$ m/min auftreten, wird dieser Wert für die Variation der Vorschubgeschwindigkeit weiterverwendet (Abbildung 4-61). Die Ergebnisse der Rauheitsmessung zeigen ein Minimum der gemittelten Rautiefe von $R_z = 1,85$ μm bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 53$ mm/s. Eine weitere Erhöhung des Vorschubs führt erwartungsgemäß aufgrund des höheren Zeitspanvolumens, tendenziell zu steigenden Oberflächenrauheiten. Gemessen an der gemittelten Rautiefe liegen damit die erreichten Oberflächenqualitäten am ABS ($R_z = 1,85$ μm) sehr nah an den Werten am Aluminium ($R_z = 1,87$ μm).

Da bei der Zerspanung des Aluminiums mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit auch eine Zunahme der Werkzeugabdrängung auftritt, wird die Positionsmessung bei $v_f = 103$ mm/s genauer betrachtet (Abbildung 4-62). Die Messungen zeigen, dass mit Beginn des Werkzeugeingriffs der Fräser um 0,06 mm von der programmierten Bahn abgedrängt wird. Dabei schwankt die Robotergeschwindigkeit um $\pm 1,55\%$.

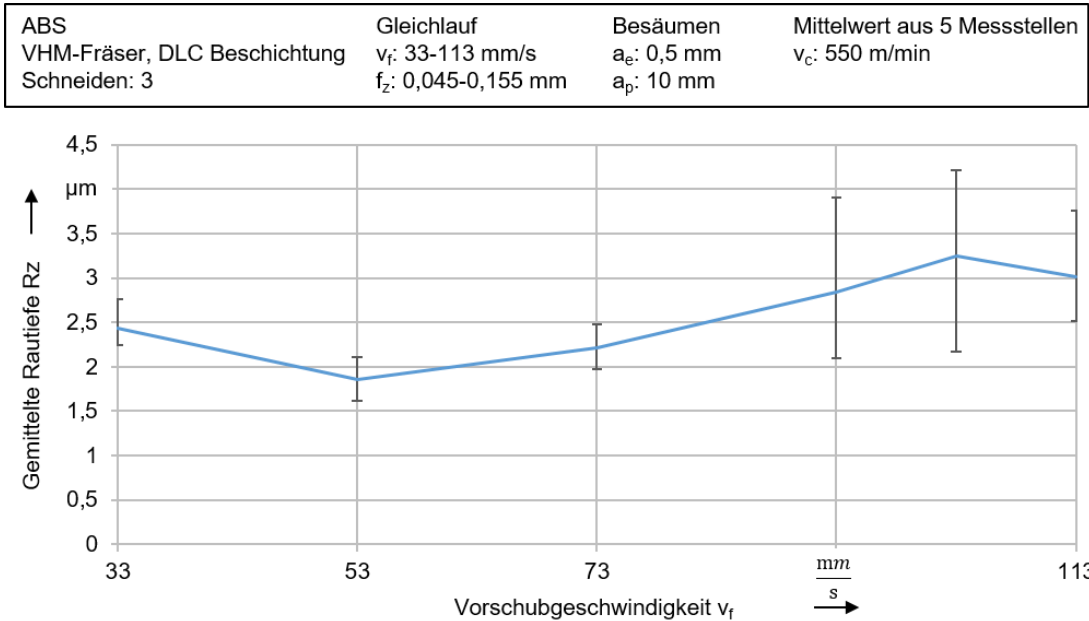


Abbildung 4-61: Ergebnisse Rauheitsmessungen im ABS bei Variation des Vorschubs

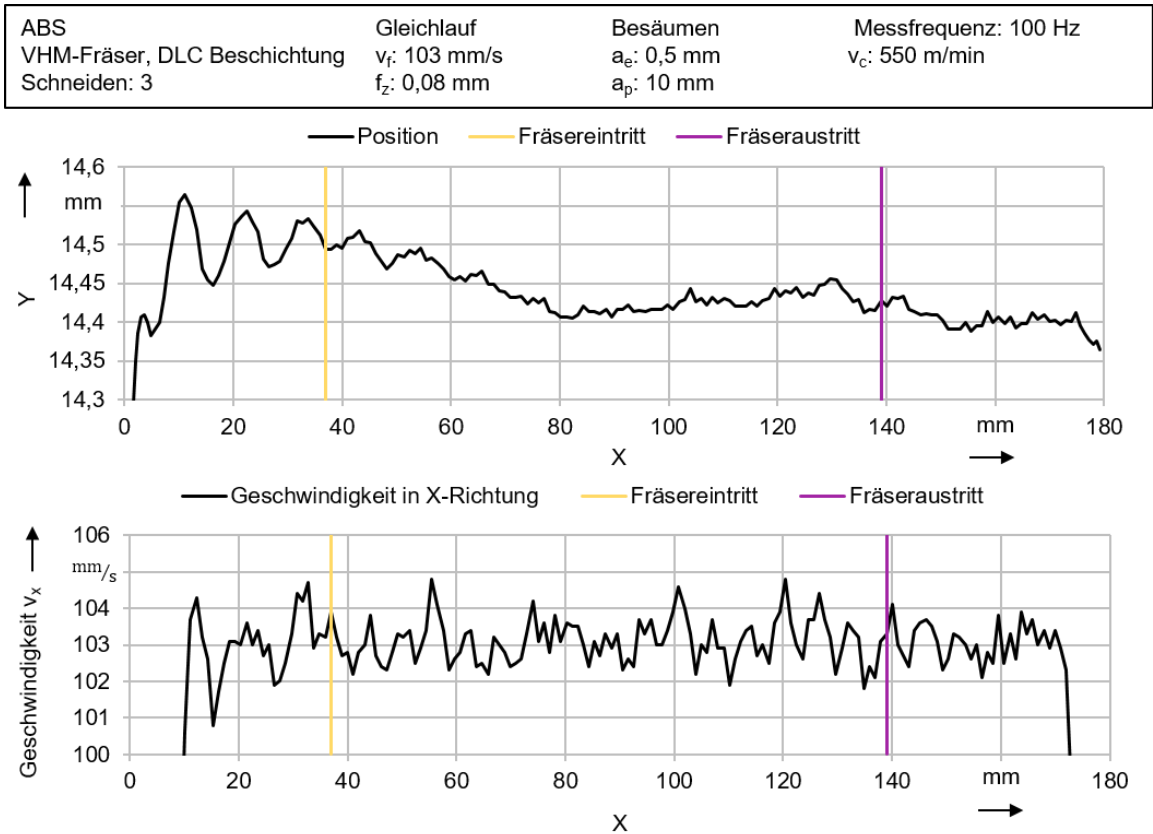


Abbildung 4-62: Messergebnis Position und Geschwindigkeitsmessung ABS

Die weiteren Zerspanversuche dienten der Ermittlung der Grenzschnitttiefe im ABS. Dazu wurden, analog zum Aluminium, Treppenstufen in das ABS eingearbeitet, sodass die Schnitttiefe alle 20 mm um 1 mm erhöht wird. Als Einstellparameter wurden die beim Besäumen ermittelten Werte für v_c und v_f verwendet.

Aus der Auswertung der Versuchsreihe zur Ermittlung der Grenzschnitttiefe an Aluminium geht hervor, dass sich das Prozessverhalten je zusätzlichem Millimeter Schnitttiefe wiederkehrend verändert. Am ABS trat kein Rattern auf, wodurch am Nutgrund keine Unregelmäßigkeiten zu erkennen waren. An den Flanken traten Formabweichungen in Form von Kerben am Fräseraustritt und Welligkeiten auf. Weiterhin ist auffällig, dass die gefrästen Nuten auch bei geringer Schnitttiefe um $\sim 0,2$ mm bis 0,3 mm tiefer sind als in der Robotersteuerung einprogrammiert (Abbildung 4-63). Es tritt ein Bahnversatz vor und nach dem Werkzeugeingriff auf, der zwischen 0,2 mm und 0,05 mm beträgt. Die Ursache für die geringeren Abweichungen im Vergleich zum Aluminium liegt in den deutlich geringeren Prozesskräften.

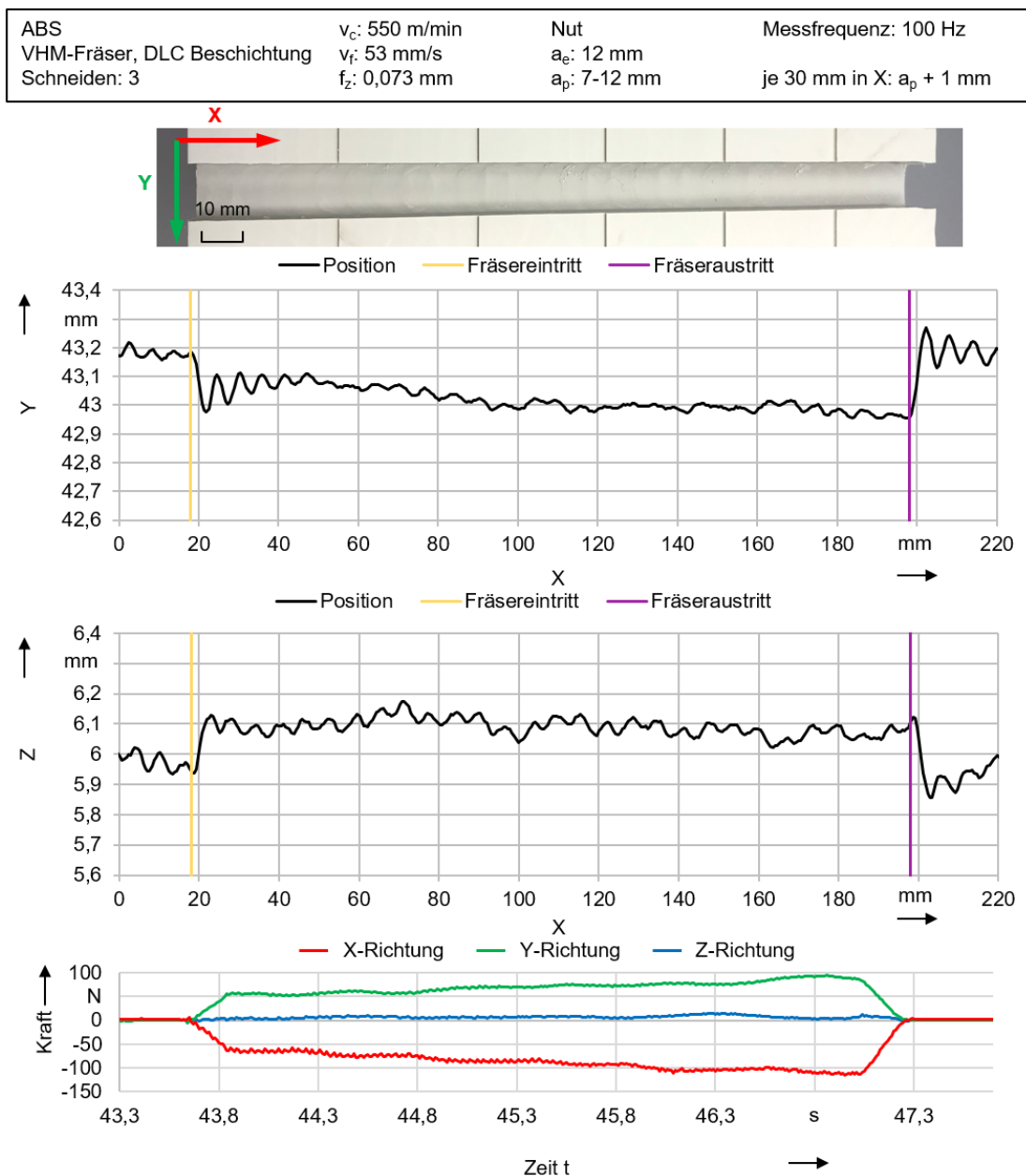


Abbildung 4-63: Ergebnisse Vollnut ABS

Am Ende der Versuchsreihe kann festgehalten werden, dass bei der Zerspanung von ABS die folgenden Einstellparameter verwendet werden können:

- $v_{c_ABS} = 550 \text{ m/min}$, $v_f_ABS = 53 \text{ mm/s}$, $a_{p_ABS} = 12 \text{ mm}$ ($Q = 458 \text{ cm}^3/\text{min}$)

Aufgrund der aufgetretenen Formabweichungen sollte zur Herstellung einer Nut mittels Roboter ein Werkzeug eingesetzt werden, dass einen geringeren Durchmesser als die herzustellende Nutbreite aufweist. Somit kann die Sollkontur durch einen nachgelagerten Schlichtprozess hergestellt werden.

Für das Schruppen großer Volumina können, unter Beachtung eines Aufmaßes von mindestens 0,3 mm in Z- und 0,8 mm in Y-Richtung, die Einstellparameter $v_c = 550 \text{ m/min}$ und $v_f = 93 \text{ mm/s}$ bei $a_p = 12 \text{ mm}$ eingesetzt werden. Somit lässt sich ein Zeitspanvolumen von $Q = 804 \text{ cm}^3/\text{min}$ erzielen.

Zerspanung des Hybridwerkstoffs

Der Hybridwerkstoff besteht aus zwei quaderförmigen Werkstücken aus Aluminium und ABS, die mit 2K-Acrylat-Klebstoff (3M SW DP 8407 NS) verklebt wurden. Als Bearbeitungslänge ergeben sich insgesamt 103 mm. Mit den Einstellparametern zum Schlichten des Aluminiums konnte mit $R_z = 1,54 \text{ }\mu\text{m}$ eine geringere gemittelte Rautiefe erzielt werden (Tabelle 4-11). Somit können die gewählten Einstellparameter auch für das Schlichten des Hybridbauteils, ohne Anpassungen beim Werkstoffübergang, verwendet werden. Auffällig ist, dass mit den Einstellparametern zum Schlichten von ABS eine Oberflächenrauheit von $R_z = 3,44 \text{ }\mu\text{m}$ auftrat. Eine mögliche Ursache könnte Verschleiß am Werkzeug sein.

Tabelle 4-11: Gemittelte Rautiefe R_z und Formabweichungen Schruppen

Parameter	Einstellparameter Schruppen Al	Einstellparameter Schruppen ABS
a_e , a_p , GL/GG	$a_e = 2,5 \text{ mm}$, $a_p = 10 \text{ mm}$, Gleichlauf	
v_c	570 m/min	550 m/min
v_f	43 mm/min	53 mm/min
f_z	0,057 mm	0,073 mm
Gemittelte Rautiefe R_z	Mittelwert aus 3 bzw. 6 Messstellen	
ABS	1,54 μm	3,44 μm
Al	2,48 μm	4,24 μm
Gesamt	2,01 μm	3,84 μm
Formabweichungen	Abdrängung gemäß Positionsmessung; Kerbe	
Seitliche Abdrängung	0,32 mm	0,31 mm
Tiefe Kerbe t_k	0,4 mm	0,6 mm

Wie auch beim Schlichten des Hybridbauteils weicht die tatsächliche Bahn des Roboters von der programmierten Bahn deutlich ab. Somit wird der eingestellte Arbeitseingriff nicht immer vollständig erreicht (Abbildung 4-64).

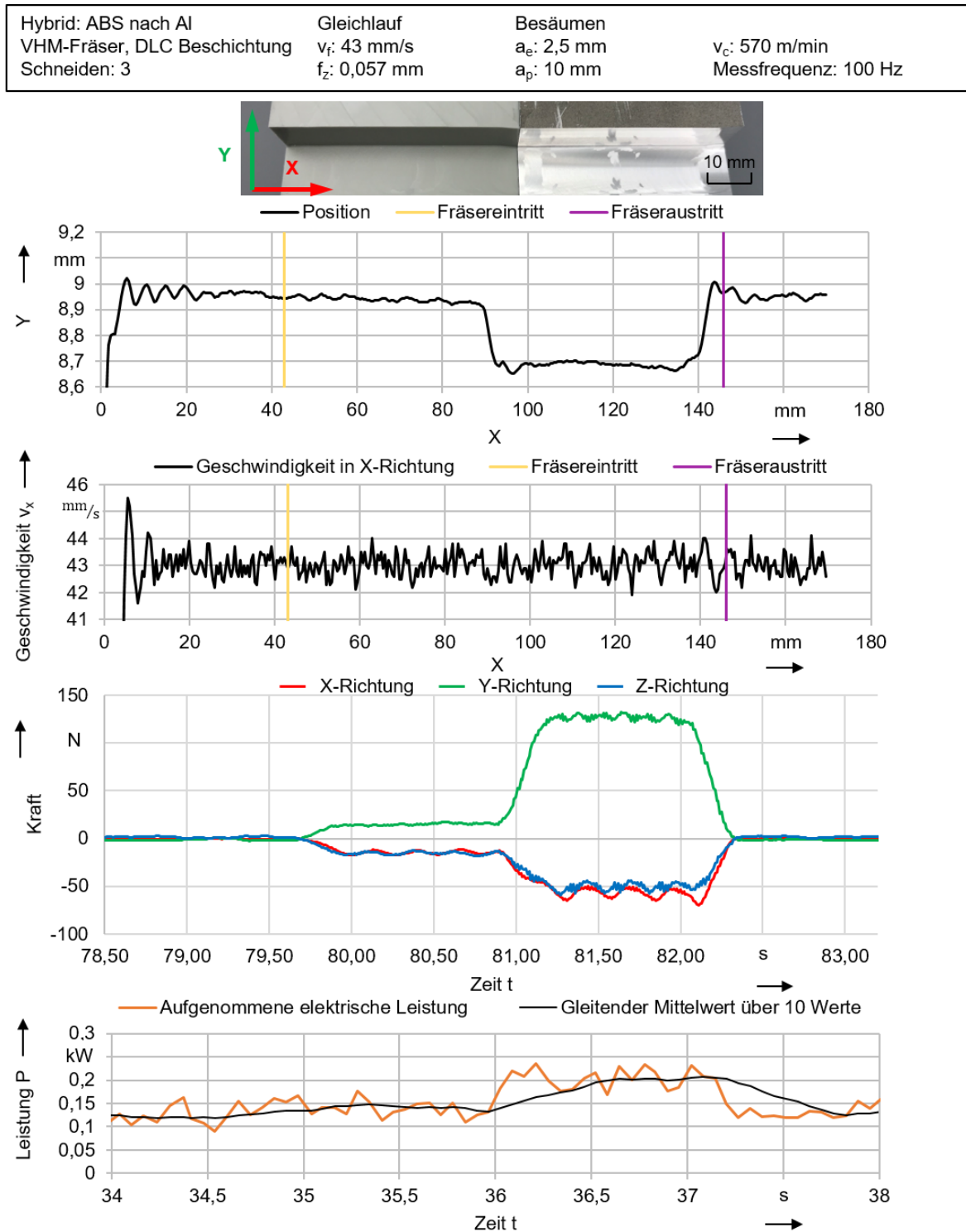


Abbildung 4-64: Ergebnisse Schruppen/Besäumen des Hybridwerkstoffs

Die beobachteten Formabweichungen treten vorrangig orthogonal zur Vorschubrichtung (Y-Richtung) zum Werkzeugeingriff, am Werkstoffübergang sowie am Werkzeugaustritt auf. Aus den Kraftmessungen wird deutlich, dass beim Werkstoffübergang vom Kunststoff zum Aluminium die Schnittkräfte von ~ 30 N auf über 300 N ansteigen, wodurch das Werkzeug sprunghaft um 0,3 mm in Y-Richtung abgedrängt wird. Beim Fräseraustritt fallen die Schnittkräfte ab und erzeugen eine weitere Formabweichung. Dabei kehrt der Roboter zur ursprünglichen programmierten Bahn zurück. Das Geschwindigkeitsdiagramm zeigt keine Besonderheiten, die auf den Übergang zurückzuführen sind. Die Schwankungen liegen im Eingriff bei ca. $\pm 1,2$ mm/s. Aus der Leistungsmessung kann der Werkstoffübergang nicht eindeutig bestimmt werden, da sich die Messwerte bei der Zerspanung von ABS nur geringfügig von den des Aluminiums unterscheiden.

Neben dem Schlichten wurde weiterhin das Vollnutfräsen mit den bisher erarbeiteten Einstellparametern am Hybridwerkstoff untersucht. Bei der Durchführung dieser Versuche sind gegenüber den Versuchen an den monolithischen Werkstoffen keine Besonderheiten beobachtet worden.

Beim Eingriff des Werkzeugs in den ABS eine Formabweichung von 0,15 mm in Y-Richtung gemessen (Abbildung 4-65). Am Werkstoffübergang, steigt die Schnittkraft erneut stark an, sodass es zu einem Versatz von 0,92 mm zur ursprünglichen Bahn im ABS kommt. Dieser bleibt während des Werkzeugeingriffs im Aluminium bestehen. Der Werkstoffübergang ist aus den Positionsmessungen eindeutig erkennbar. Nach dem Fräseraustritt kehrt der Roboter zur ursprünglichen Bahn zurück, wobei es zu einem Überspringen in vertikaler Richtung kommt.

Das Geschwindigkeitsdiagramm zeigt am Werkstoffübergang einen kurzen Abfall und anschließend einen Anstieg. Hier wird der Roboter durch die höheren Schnittkräfte im Aluminium abgebremst und korrigiert dies mit einem Überspringen. Beim Fräseraustritt steigt die Geschwindigkeit sprunghaft auf 36,6 mm/s an, was durch die Regelung des Roboters korrigiert wird, wobei ein Überspringen von 23,2 mm/s auftritt. Der Roboter reagiert träge auf die veränderten Bedingungen, wodurch diese Abweichungen begründet werden können. Die Kraftmessung weist Ähnlichkeiten zur Untersuchung mit den Parametern des Schlichtprozesses auf. Für die Schnittkraft wurde ein Wert von 100 N im ABS und 592 N nach dem Werkstoffübergang zum Aluminium gemessen. Dies entspricht während des Prozesses einem Anstieg der Kräfte um den Faktor sechs beim Werkstoffübergang, wodurch die Formabweichung zunimmt. Aus der Leistungsmessung geht hervor, dass beim Werkstoffübergang ein Anstieg von ca. 0,2 kW im ABS auf bis zu 0,5 kW im Aluminium auftritt. Dieser Unterschied ist jedoch zu gering, um daraus den Werkstoffübergang im Prozess eindeutig zu detektieren.

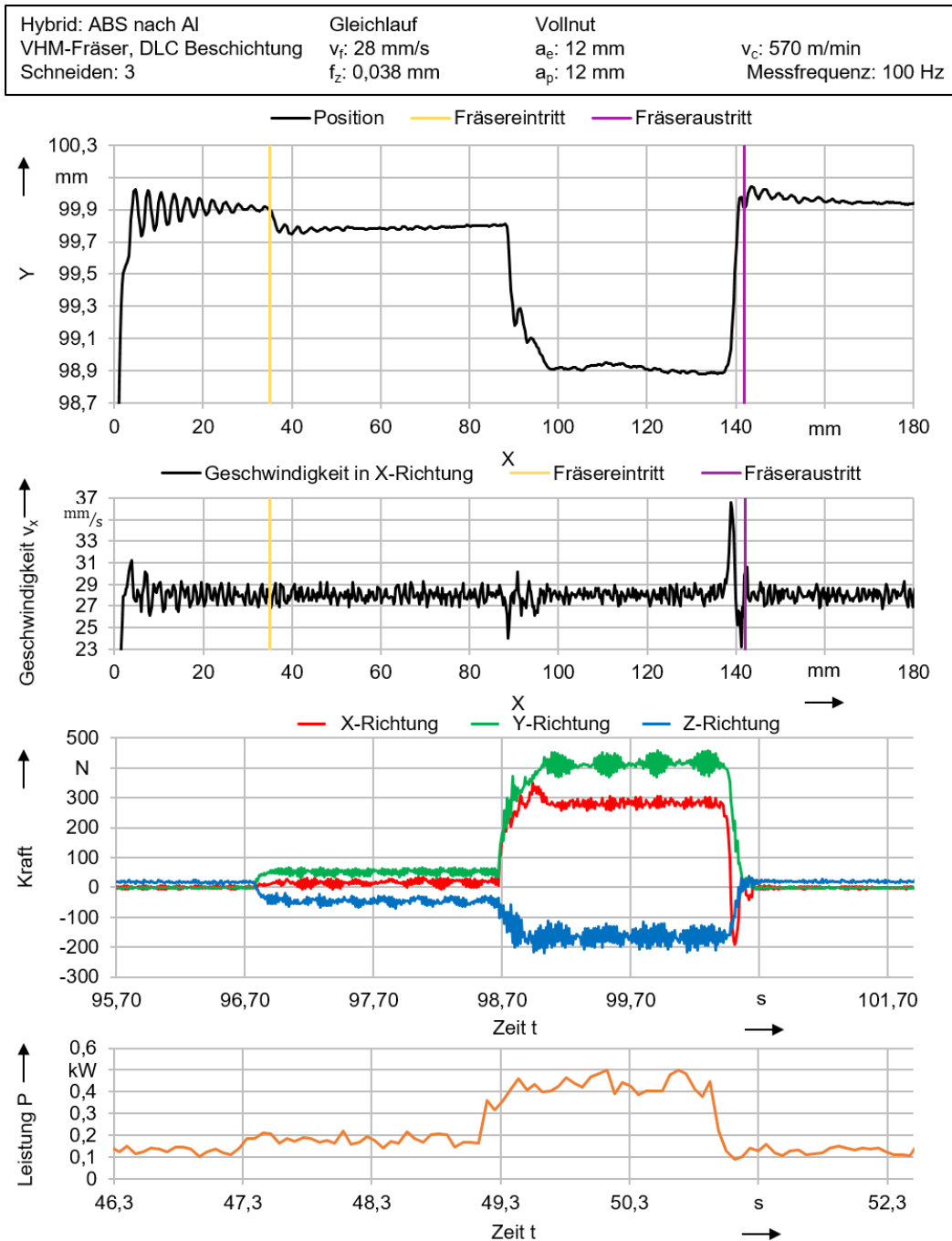


Abbildung 4-65: Vollnut Hybridwerkstoff

Es zeigt sich, dass insbesondere beim Vollnutfräsen Formabweichungen auftreten, die durch eine seitliche Abdrängung des Werkzeugs entstehen (Abbildung 4-66). Als Ursache dieser Abweichung im Eingriff, können insbesondere die aufgetretenen Prozesskräfte identifiziert werden. Diese werden vorrangig von dem Werkstoff und dem eingestellten Zeitspannvolumen beeinflusst. Sowohl beim Schruppen als auch beim Vollnutfräsen wurde ein Kraftanstieg am Werkstoffübergang vom Kunststoff zum Aluminium um den Faktor sechs gemessen. Die Bearbeitungsrichtung hat auf diesen Zusammenhang keinen signifikanten Einfluss.

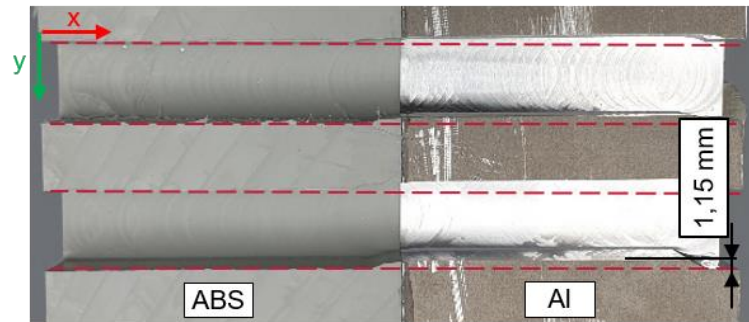
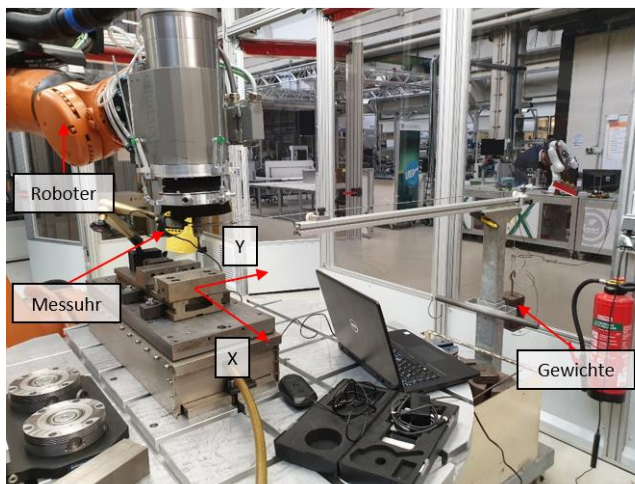


Abbildung 4-66: Abdrängung am Werkstück ©IWF

Die während der Untersuchungen aufgetretenen Formabweichungen können auf die Steifigkeit des Roboters zurückgeführt werden. Im Vergleich zu einem Bearbeitungszentrum weisen Roboter eine deutlich geringere Gesamtsteifigkeit auf, welche auf die sechs einzeln beweglichen Achsen zurückzuführen ist. Daher wurde im nächsten Arbeitsschritt die statische Steifigkeit des verwendeten Kuka KR300 Roboters gemessen. Dazu wurde der Roboter an der Werkzeugeinspannung mit definierten Gewichten zwischen 25 N und 100 N über eine Umlenkrolle in Vorschubrichtung (X-Richtung) sowie orthogonal zur Vorschubrichtung (Y-Richtung) belastet und die Abdrängung mit einer Feinmessuhr gemessen. (Abbildung 4-67).



Position 1: Konfiguration vor der Zerspanung

Position 2: Konfiguration nach der Zerspanung

Position 3: Roboter gestaucht

Position 4: Roboter gestreckt

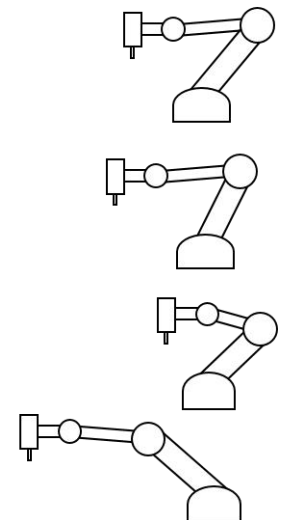


Abbildung 4-67: Versuchsaufbau zu Bestimmung der statischen Robotersteifigkeit ©IWF

Für die Messungen wurden vier verschiedene Achskonfigurationen mit dem Roboter eingestellt. Dabei werden zuerst die Positionen angefahren, die der Roboter unmittelbar vor Beginn der Zerspanung (Pos. 1) bzw. nach Ende der Zerspanung (Pos. 2) annimmt. Weiterhin wurde der Roboter in eine Konfiguration gebracht, in der alle Achsen so weit wie möglich gestaucht (Pos. 3) bzw. gestreckt (Pos. 4) sind. Dabei stellen die Positionen 3 und 4 Extremfälle dar, in der die Steifigkeit am höchsten (Roboter gestaucht) bzw. am niedrigsten (Roboter gestreckt) zu erwarten ist.

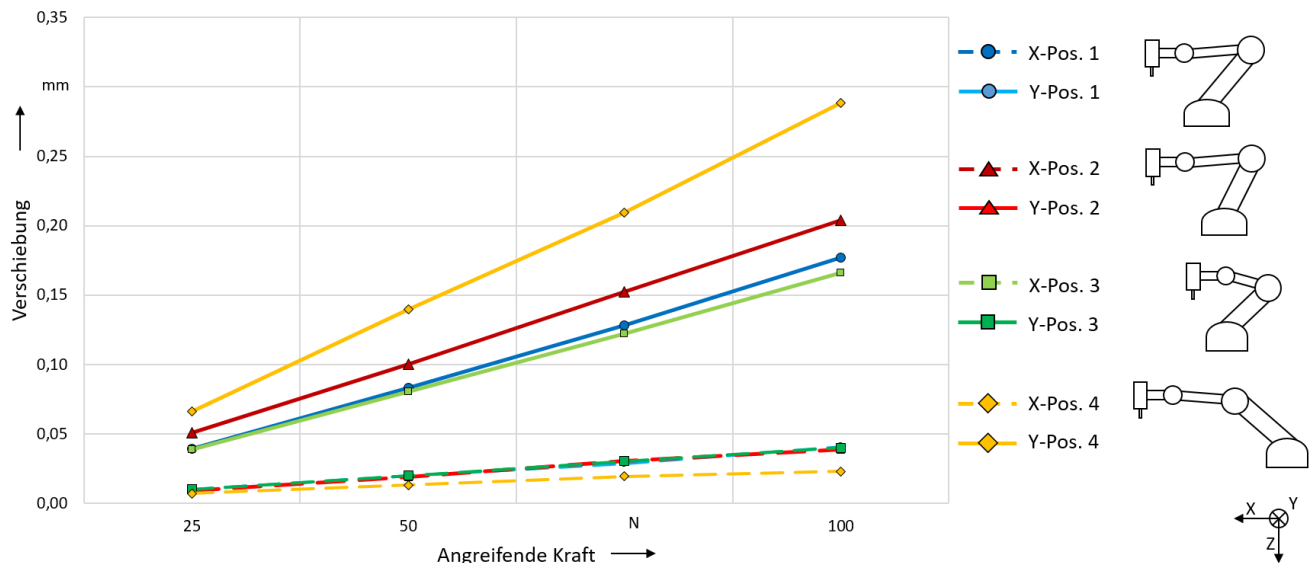


Abbildung 4-68: Statische Steifigkeit des Roboters

Die Messungen zeigen, dass die Verschiebung des Roboters in Vorschubrichtung (X-Richtung) sehr gering ist (Abbildung 4-68). Bei der Belastung mit 25 N trat in allen drei Roboterkonfigurationen eine Verschiebung zwischen 0,04 mm (Pos. 3) und 0,07 mm (Pos. 4) auf. Mit zunehmender Belastung steigt die Verschiebung linear an. Dabei wird unter Belastung von 100 N eine Verschiebung von maximal 0,04 mm (Pos. 3) gemessen. Dies entspricht einer maximalen Nachgiebigkeit von $0,4 \mu\text{m/N}$ in Vorschubrichtung und ist somit vernachlässigbar klein.

Die Verschiebungen in Y-Richtung sind durchschnittlich um den Faktor 10 größer als in Vorschubrichtung. Bereits bei einer Last von 25 N treten Verschiebungen zwischen 0,04 mm (Pos. 3) und 0,065 mm (Pos. 4) auf. Diese weisen bei Erhöhung der Last einen linearen Anstieg auf. Somit beträgt die geringste gemessene Verschiebung 0,16 mm (Pos. 3) bei einer Belastung mit 100 N. Die größte Verschiebung tritt an dem vollständig gestreckten Roboter (Pos. 4) auf und beträgt 0,28 mm. Dies entspricht einer Nachgiebigkeit von $2,8 \mu\text{m/N}$. Dadurch, dass die Positionen 1 und 2 nur 100 mm auseinanderliegen weichen die Verschiebungen an diesen Positionen bei Belastung lediglich geringfügig voneinander ab und betragen 0,13 mm (Pos. 1) bzw. 0,15 mm (Pos. 2). Umgerechnet auf die in den Untersuchungen gemessenen Belastungen von $\sim 600 \text{ N}$ ergibt dies eine Abweichung von $\sim 1 \text{ mm}$, was genau dem Wert der Abdrängung des Fräsers bei der Zerspaltung von Aluminium entspricht.

Fazit und Auswahl der zu regelnden Größe

Die Unterschiede im Prozessverhalten der Werkstoffe ABS und Aluminium sind eindeutig in den Messungen erkennbar und quantifizierbar. Der Werkstoffübergang ist durch eine Positionsabweichung in Y-Richtung und der unterschiedlichen Prozesskräfte deutlich erkennbar.

Für ein optimales Prozessergebnis muss die Werkzeugabdrängung durch Anpassung der Einstellparameter mit einer Prozessregelung kompensiert werden. Daher eignet sich die Positionsmessung lediglich zu Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Prozessregelung. Da die reale Geschwindigkeit des Roboters aus den Positionsmessungen berechnet wurde, kann diese Größe nicht als zu regelnder Parameter verwendet werden. Aus den Leistungsmessungen konnte der Werkstoffübergang im Rahmen der Untersuchungen nicht eindeutig ermittelt werden. Weiterhin wurden vereinzelt Untersuchungen mit

einem Körperschallsensor durchgeführt. Dieser muss jedoch Prozessbedingt zu weit von der Zerspanstelle entfernt angebracht werden. Somit ist zwar der Werkzeugeingriff erkennbar, jedoch wird aus den Messungen nicht deutlich, welcher Werkstoff zuerst zerspannt wird. Es ist lediglich eine „Differenzmessung“ möglich, wodurch dieses Messprinzip nicht geeignet für eine Prozessregelung ist. Die einzige Größe, die Prozesssicher aufgenommen werden und aus der eindeutig der Werkzeugeingriff, -austritt sowie der Werkstoffübergang erkannt werden kann, ist die Zerspankraft. Diese wird durch die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst, welche als Stellgröße definiert wird. Für eine industrielle Anwendung kann in der Roboterzelle eine Kraftmessdose eingesetzt werden. Diese wird zwischen den Roboterflansch und der Maschinenspindel montiert.

Aufbau der Prozessregelung

Für den Aufbau der Prozessregelung wird das Programm *LabView* verwendet. Aufgrund der Trägheit des zu regelnden Systems (Roboter) wird ein P-Regler aufgebaut. Durch diesen wird die Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit der gemessenen Zerspankräfte angepasst, wodurch die Werkzeugabdrängung reduziert werden soll (Abbildung 4-69).

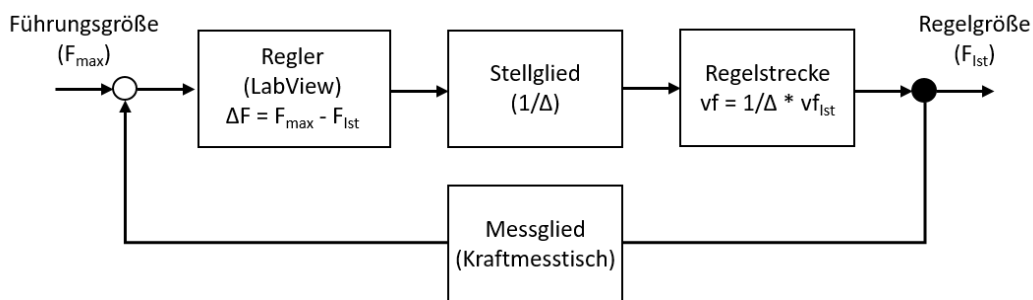


Abbildung 4-69: Regeldiagramm

Die während der Zerspanung auftretenden Zerspankräfte werden von dem Kraftmesstisch aufgenommen und anschließend die wirkende Aktivkraft in *LabView* berechnet. Im Rahmen der Zerspanversuche zeigte sich, dass die auftretenden Kräfte im Aluminium, unabhängig vom Prozess (Schruppen/Schlichten), um den Faktor sechs höher als beim ABS sind. Sobald diese Veränderung auftritt, greift die Regelung in den Prozess ein und passt die Vorschubgeschwindigkeit auf den gegenwärtig zerspannten Werkstoff an. Aufgrund der während der Untersuchungen ermittelten Einstellparameter wurde als untere Grenze eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 20$ mm/s und als obere Grenze $v_f = 60$ mm/s festgelegt. Mit diesen Geschwindigkeiten kann sowohl das Vollnutfräsen von Aluminium als auch von durchgeführt werden. Innerhalb dieser Grenzen kann die Prozessregelung die Vorschubgeschwindigkeit auf die auftretenden Zerspankräfte anpassen. Die maximalen Prozesskräfte, bis zu der der Zerspanprozess sicher abläuft, wurde für ABS 150 N und für Aluminium 600 N definiert. Während der Zerspanung werden die wirkenden Kräfte aufgenommen und ausgewertet. In *LabView* erfolgt die Berechnung der Differenz aus der Maximalkraft und der aktuellen Ist-Kraft. Von diesem Wert wird der Kehrwert gebildet, um zu ermitteln, um wieviel die Vorschubgeschwindigkeit gesteigert werden kann. Der berechnete Wert entspricht dem noch übrigen „Potential“ um das v_f erhöht oder verringert werden muss. Sobald während der Zerspanung die Aktivkraft bspw. sprunghaft ansteigt wird durch die Regelung der Bearbeitungsfall ABS in Aluminium durch die Software erkannt und die Vorschubgeschwindigkeit entsprechend angepasst. Dieser Wert kann anschließend an die Steuerung weitergegeben werden. Parallel dazu werden die entstehenden Kräfte sowie die eingestellte Vorschubgeschwindigkeit in einem Textdokument gespeichert und können anschließend separat ausgewertet werden.

Das Regelungsprogramm ist gegenwärtig für den Anwendungsfall der Zerspaltung von Hybridwerkstoffen aus ABS und Aluminium ausgelegt. Eine Modifikation auf andere Werkstoffkombinationen ist gegeben. Dafür können in der Benutzeroberfläche die Grenzen der Vorschubgeschwindigkeit und der Zerspalkraft manuell eingestellt werden. Diese Daten werden beim Beenden des Programms gespeichert und können beim Programmneustart für weitere Anwendungen direkt verwendet werden.

Die Regelung wurde im Rahmen von Zerspaltversuchen getestet (Abbildung 4-70). Dabei wurden beide Bearbeitungsrichtungen untersucht.

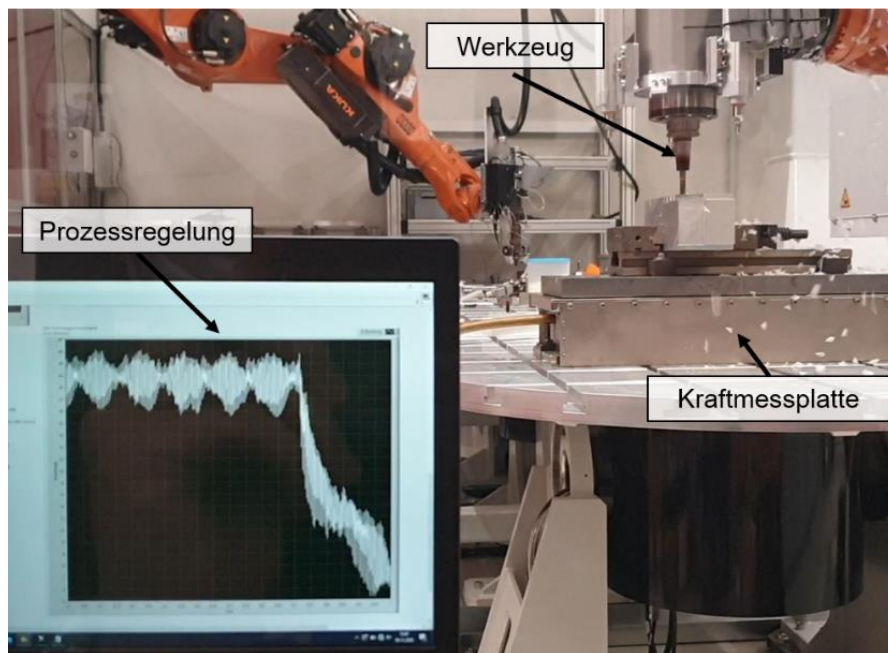


Abbildung 4-70: Prozessregelung am IML ©IWF

Es zeigte sich, dass mit dem Programm die einzelnen Werkstoffe während des Prozesses erkannt und die zugehörigen Vorschubgeschwindigkeiten berechnet, visualisiert und ausgegeben werden können. Problematisch ist die Trägheit des Roboters. Im Idealen Fall erfolgt die Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit direkt beim Werkzeugeintritt sowie am Werkstoffübergang. Im realen Prozess erfolgt diese Anpassung jedoch erst, wenn der Fräser den Werkstoffübergang bereits überschritten hat. Somit sind geringfügige Qualitätseinbußen durch nicht optimale Einstellparameter, insbesondere bei der Bearbeitungsrichtung ABS in Aluminium, die Folge. Zur Lösung könnte die Regelung weiter auf den Werkstoffübergang sensitiviert werden sodass diese schneller in den Bearbeitungsprozess eingreifen kann. Eine weitere Optimierung stellt die programmseitige Integration der Werkstückgeometrie mit den Werkstoffübergängen und den einzusetzenden Schnittparametern dar. Der Roboter würde die Bearbeitung somit ohne Verzögerung, mit angepassten Parametern am Werkstoffübergang ausführen.

Das Ziel, geeignete Einstellparameter für die robotergestützte Fräsbearbeitung von Hybridwerkstoffen zu erarbeiten wurde erfüllt. Durch die Überwachung der auftretenden Zerspalkraft mithilfe von geeigneter Sensorik kann sowohl der Werkzeugeingriff als auch der Werkstoffübergang im Prozess identifiziert werden. Aufgrund der Messdaten wurde eine Prozessregelung entwickelt, die in der Lage ist die Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit der auftretenden Zerspalkräfte einzustellen.

4.5 Anlagenkonzepte für die entwickelte Prozesskette

In Kapitel 4.5 wurden mögliche Anlagenkonzepte zur Umsetzung der entwickelten flexiblen Prozesskette entwickelt. Das Ziel war dabei die im Projekt neu- und teilweise weiterentwickelten Endeffektoren zu integrieren. Zu Beginn wurden auf Basis der in Kapitel 4.1 dargestellten Infrastruktur weitere Konzepte für eine industrielle Umsetzung der Prozesskette erarbeitet. Dabei standen zwei Ansätze für die roboterbasierte Anlage zur Auswahl. Zum einen können die Endeffektoren fest verbaut werden, wobei das zu fertigende Bauteil durch einen Roboter geführt wird. Zum anderen können die Endeffektoren bewegt und das Bauteil fest eingespannt werden.

Der Vorteil des bewegten Bauteils ist, dass nur geringe Lasten bewegt werden müssen. Lediglich eine Vorrichtung inklusive Halbzeug und dem aufgetragenen Kunststoff müssen vom Roboter bewegt werden. Außerdem könnten so größere und schwerere Extruder eingesetzt werden, da diese, wie in Kapitel 4.3 dargestellt durch eine Verrohrung außerhalb der Anlage platziert und die Auftragsdüse in der Anlage verbaut werden können. Nachteilig ist jedoch der erforderliche Arbeitsraum des Roboters, damit dieser die einzelnen Werkzeuge flexibel und problemlos erreichen kann. Aus diesem Grund wurde sich dazu entschieden, das Konzept der „bewegten Werkzeuge“ dem des „bewegten Bauteils“ vorzuziehen. Dennoch wurde das Konzept „bewegtes Bauteil“ mit zwei kollaborierenden Robotern exemplarisch dargestellt und untersucht. Dabei wird der Extruder fest im Raum positioniert und das Druckbett von einem Roboter geführt. Die Nachbearbeitung wird mit einem zweiten Roboter durchgeführt, wobei der druckbettführende Roboter als multiaxiale Positionierkinematik dient.

Anlagenkonzept „feste Bauteile“

Der Anlagenprototyp orientiert sich an einer Standardroboteranlage mit einem Arbeitsraum von 650 mm x 500 mm x 460 mm. Als Roboter wird ein ABB IRB 4600 mit einer Traglast von 45 kg für die einzelnen Endeffektoren verwendet. Je nach Bauteil kann auf einen Dreh-Kipp-Tisch oder einen Rahmen mit bauteilspezifischer Aufspannung zurückgegriffen werden. Beide Vorrichtungen können je nach Anwendungsfall und zu fertigendem Bauteil genutzt werden, um die Zugänglichkeit zum Bauteil zu verbessern und die Bearbeitung zu erleichtern. Der Rahmen inklusive aufgespanntem Demonstrator ist in Abbildung 4-71 zu sehen.

Des Weiteren werden die Ständer der Endeffektoren auf der rechten Seite gezeigt. Diese sind leicht angewinkelt, um die Entnahme der Werkzeuge zu vereinfachen. Auf der dargestellten Seite werden aus Gründen der Anlagengröße nur zwei der drei Endeffektoren abgelegt.

Dabei handelt es sich um die Frässpindel inklusive Absaughaube und das Strukturierungswerkzeug FauST. Der dritte Endeffektor (Extruder) befindet sich auf der anderen Seite der Anlage. Damit der Wechsel der Endeffektoren automatisiert durchgeführt werden kann, wurde auf Standardwechselsysteme der Firma Schunk zurückgegriffen. Diese lassen sich einfach mittels Druckluft ansteuern und sorgen für ein wiederholgenaues und schnelles An- und Abkoppeln der Werkzeuge. Darüber hinaus wurden angesteuerte Verfahrschienen über dem Roboter positioniert, damit sich Verkabelungen und Leitungen der Werkzeuge bei einem Wechsel der Endeffektoren nicht verknoten. Diese Schienen wurden als externe Achsen in die Robotersteuerung und die Planungsumgebung in Robotmaster integriert, damit sich diese synchron zum erstellten Bearbeitungsprogramm bewegen. Durch diese Erweiterung kann die Bewegungsfreiheit des Bearbeitungsroboters auch bei komplexen Fertigungsabläufen gewährleistet werden.

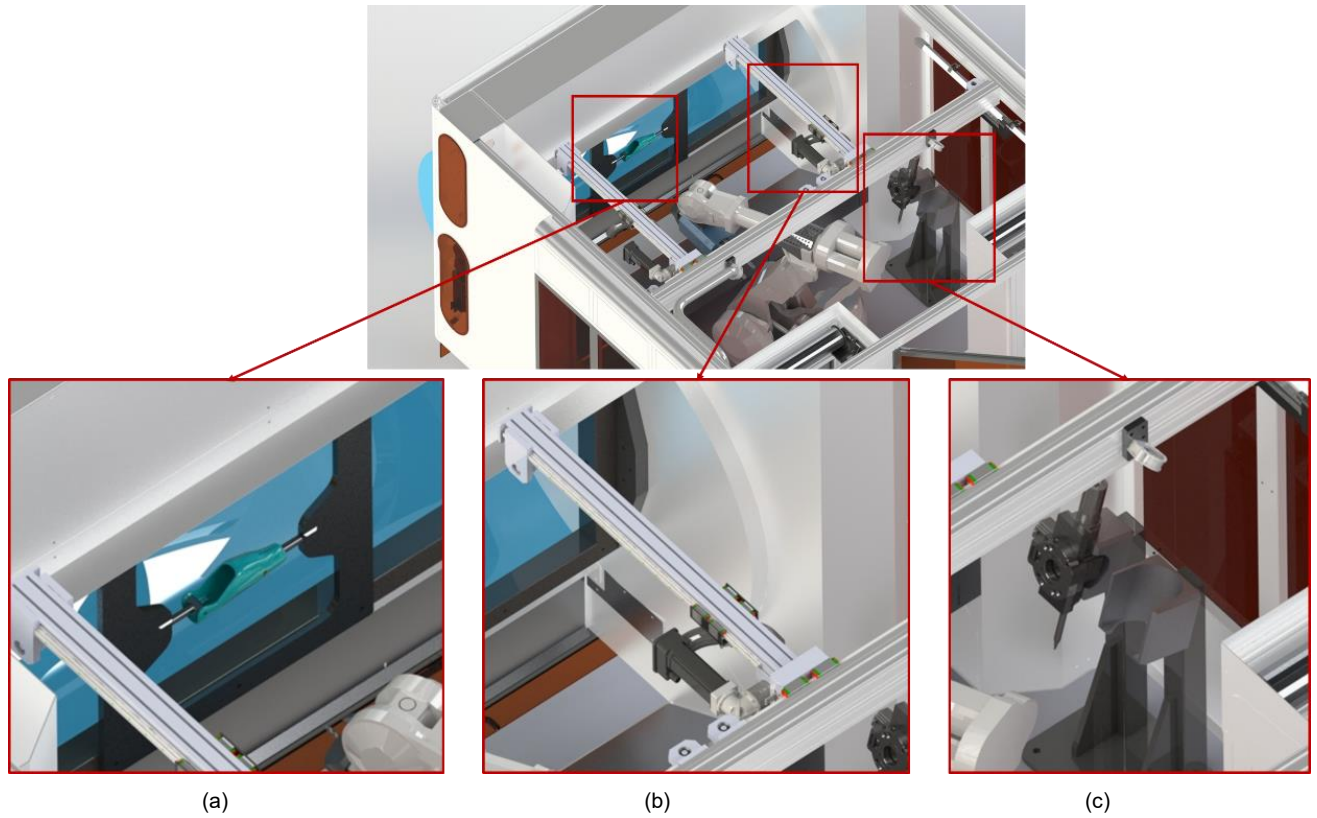


Abbildung 4-71: Ansicht der Anlage von oben inkl. Detailansichten mit
 (a) Rahmen zum Aufspannen der Bauteile, (b) Führungsschienen für Kabelpakete, (c) Halterungen der Endeffektoren ©rm

Anlagenkonzept „feste Werkzeuge“ und „kollaborierende Roboter“

Im Rahmen des Projektes wurde ein weiteres Konzept entwickelt und aufgebaut. Dabei handelt es sich um die Weiterentwicklung einer schon vorhandenen Anlagentechnik aus dem BMBF-geförderten Forschungsvorhaben „HP3D“. Wie zu Beginn des Kapitels vorgestellt, wird hier das Bauteil zum Werkzeug bewegt. Um weitere Freiheitsgrade bei der Zerspanung nutzen zu können, wird ein weiterer Roboter mit einer Frässpindel ausgestattet. Dieser nutzt den Roboter, der das Bauteil führt, als multiaxiale Positionierkinematik. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 4-72 zu sehen. Der Nutzen dieser Anlage beschränkt sich jedoch auf die subtraktive Nacharbeit additiv gefertigter Bauteile. Außerdem muss bei der Fräsbearbeitung mit geringeren Genauigkeiten gerechnet werden, da die Positionierung des Bauteils mit einer seriellen Kinematik durchgeführt wird. Insgesamt wird das Druckergebnis jedoch verbessert, da Ungenauigkeiten aus dem 3D-Druckprozess direkt korrigiert werden können. Aufgrund der Nutzung von zwei Robotern beträgt der Arbeitsraum jedoch knapp 2 m³.

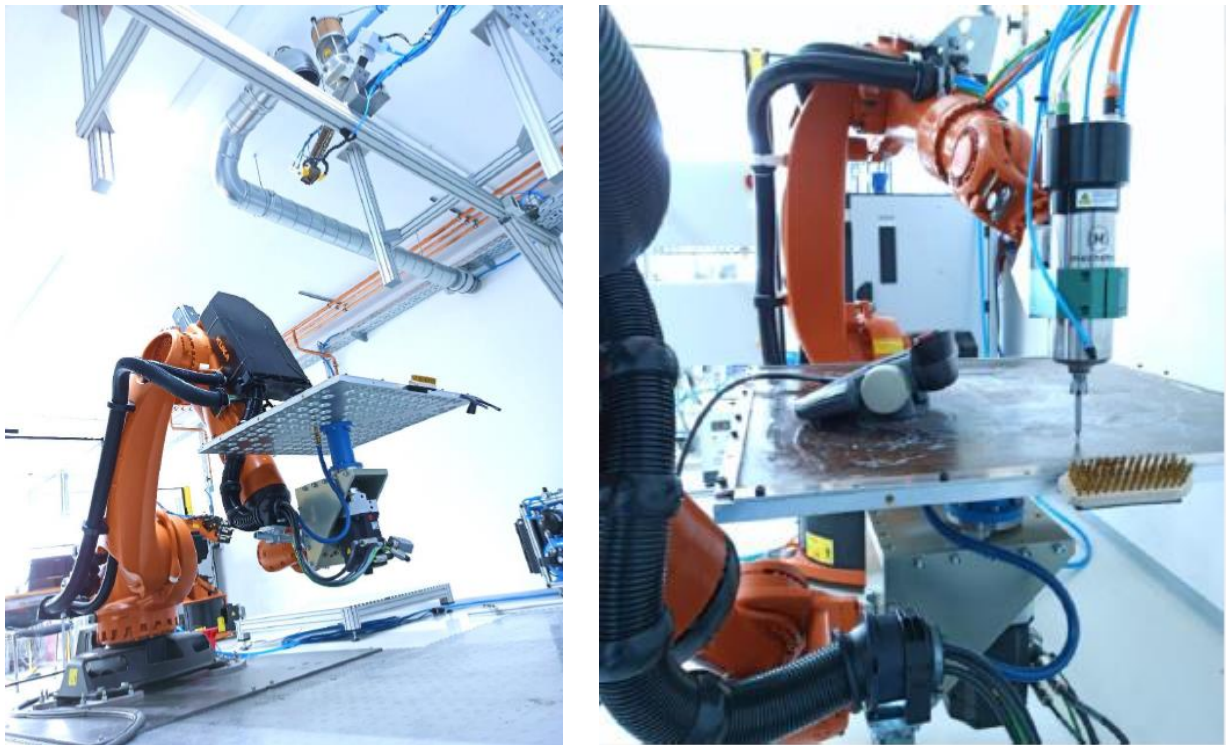


Abbildung 4-72: Aufbau einer Anlage mit kollaborierenden Robotern ©3DS

4.6 Anwendung der Prozesskette auf Demonstratorbauteile

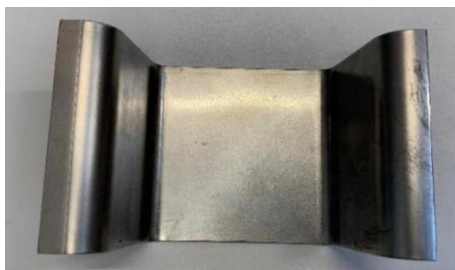
Im abschließenden Teil des Forschungsvorhabens wurde die Funktionsweise der Prozesskette anhand von zwei Metall-Kunststoff-Demonstratorbauteilen aus dem Bereich der Automobilindustrie sowie der Medizintechnik (Prothetik) empirisch evaluiert. Das untersuchte Demonstratorbauteil der Automobilindustrie stellte dabei einen Erlanger Träger dar, einem für Standarduntersuchungen verwendeten Modellträger. Für die Umsetzung wurden im Rahmen von Machbarkeitsuntersuchungen Teilabschnitte eines Erlanger Trägers verwendet. Die metallischen Profile wurden dabei mittels Umformtechnik hergestellt. Das zweite Bauteil basierte auf einer seitens des assoziierten Partners, Fa. Ottobock, zur Verfügung gestellten Kniegelenksprothese. Für die Anwendung der flexiblen Prozesskette auf die Kniegelenksprothese wurden Teile der bestehenden Konstruktion abgeleitet und durch einen Metallträger substituiert. Das für den Strukturierungsprozess sowie den Kunststoffauftrag notwendige Stützwerkzeug basiert auf einem zur Verfügung gestellten Formwerkzeug der Fa. Ottobock und wurde für die vorliegenden Anforderungen überarbeitet.

Empirische Validierung am Beispiel des Erlanger Trägers

Für die Umsetzung der Teilabschnitte eines Erlanger Trägers wurden zunächst Bleche aus AlMg3 und DC 01 zugeschnitten und unter Einsatz von Pressentechnik umgeformt. Die Materialstärke betrug dabei analog zu den bisherigen Untersuchungen je Werkstoff 3 mm. In Abbildung 4-73 ist ein Teilabschnitt des Erlanger Trägers vor der Oberflächenstrukturierung sowie der Versuchsaufbau für die Strukturierung dargestellt. Die Teilabschnitte wurden mit insgesamt 76 Verklammerungsstrukturen versehen. Es befinden sich dabei 4 mal 7 Strukturen auf dem Gurt und 4 mal 12 Strukturen an den Stegen des Trägerteilabschnitts. Die Verklammerungsstrukturen wurden zur Erhöhung der multiaxialen Haftfestigkeit alternierend angeordnet. Nach Abschluss der Oberflächenstrukturierung wurde auf den Trägerteilabschnitt, unter Verwendung des Extruders, klebstofffrei eine Kunststoffverrippung aufgetragen. Im Anschluss an den Kunststoffauftrag wurde die Oberfläche des Kunststoffs im Sinne der Prozesskette zerspannt. Dabei wurde der Kunststoff auf die definierte Höhe von 45 mm gefräst und eine glatte Funktionsoberfläche geschaffen.



(a)



(b)

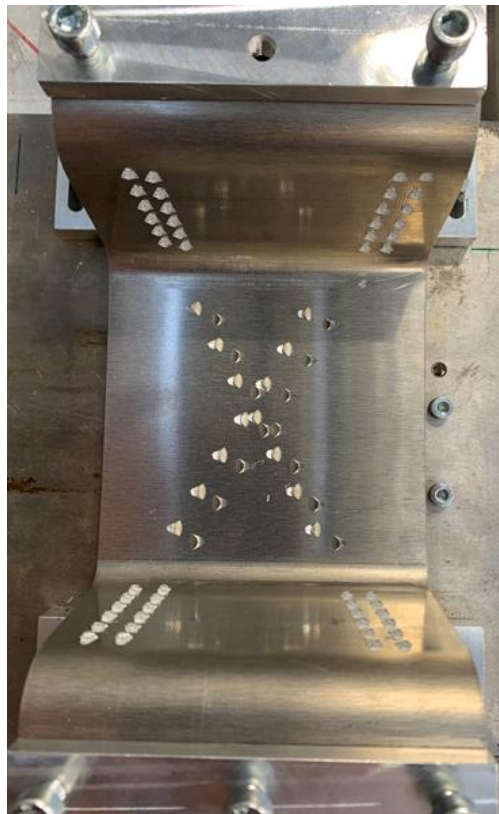
Abbildung 4-73: Versuchsvorbereitungen mit (a) Teilabschnitt des Erlanger Trägers und (b) Versuchsaufbau ©IWF

Der 3D-Druck an den Trägerabschnitten stellte eine besondere Herausforderung dar, da eine formschlüssige Verbindung zwischen Metall und Kunststoff sowohl zwischen dem Gurt des Trägerprofils, als auch mit den Stegen hergestellt werden musste. Dafür wurden alle sechs Freiheitsgrade des Roboters genutzt. Aufgrund der Schwindung des verwendeten Materials sind dennoch lokal kleine Freiräume zwischen der gedruckten Struktur und dem Metallträger vorhanden. Bei der Mehrachs-bewegung des Roboters ergaben sich variierende Geschwindigkeiten während des Prozesses. Als Folge kam es an den Eckpunkten der Versteifungsstruktur zu Ungenauigkeiten und Materialansammlungen. Dies konnte durch eine Drehzahlregelung des Extruders in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit gelöst werden. Wie aus Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.3 hervorging, hängen die Breiten und Höhen der Kunststoffraupen von der Fördermenge des Extruders und der Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters ab. Für den Fall, dass sich die Verfahrgeschwindigkeit des Roboters verringert, kann gleichzeitig die Motordrehzahl verringert werden, sodass die Fördermenge pro Meter konstant gehalten wird. Hierzu wurde folgende Berechnungsvorschrift in der Anlagensteuerung implementiert:

$$n_{Soll} = \frac{v_{Roboter}}{v_{Soll}} \cdot n_{Extruder} \cdot (1 + E_{Faktor}) \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Dabei ist $v_{Roboter}$ die Roboter-Ist-Geschwindigkeit, $n_{Extruder}$ die Extruderdrehzahl, v_{Soll} die Roboter-Soll-Geschwindigkeit und E_{Faktor} der Extrusionsfaktor. Das Verhältnis aus $n_{Extruder}$ und v_{Soll} ist dabei die in Abbildung 4-39 und Abbildung 4-41 dargestellte „normierte Motordrehzahl“. Erhöht sich die Ist-Robotergeschwindigkeit, so passt sich die Drehzahl des Extruders automatisch linear daran, sodass eine konstante Raupenablage ermöglicht wird.

Die Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte sind zusammenfassend in Abbildung 4-74 dargestellt. In Abbildung 4-74a ist zu sehen, dass die Oberfläche des U-Profils wiederholgenau in mehreren Ebenen strukturiert werden konnte. Abbildung 4-74b zeigt die auf den Strukturen aufgetragene Kunststoffverrippung. Diese wurde unter Einsatz einer 5-Achs-Strategie zuverlässig aufgetragen. Basierend auf der Drehzahlregelung konnte dabei eine konstante Bahnbreite gewährleistet werden. Die in Abbildung 4-74c zu erkennenden Spalten und Poren bilden sich durch die gewählte Roboterbahn und lassen sich mit einer veränderten Bahnplanung sowie leicht angepassten Extrusionsparametern schließen. Abbildung 4-74d zeigt abschließend die zerspannte Oberfläche der gedruckten Struktur. Bei der Zerspanung war nur der metallische Grundkörper eingespannt, so dass die auftretenden Fräskräfte durch die formschlüssigen Verklammerungsstrukturen im Kunststoff aufgenommen wurden. Die Verbindungsqualität zwischen den Verklammerungsstrukturen und dem aufgetragenen Kunststoff wurde dabei nicht beeinträchtigt und ermöglichte eine zuverlässige und genaue Zerspanung. Insgesamt demonstriert das gefertigte Bauteil die Machbarkeit der flexiblen Prozesskette.



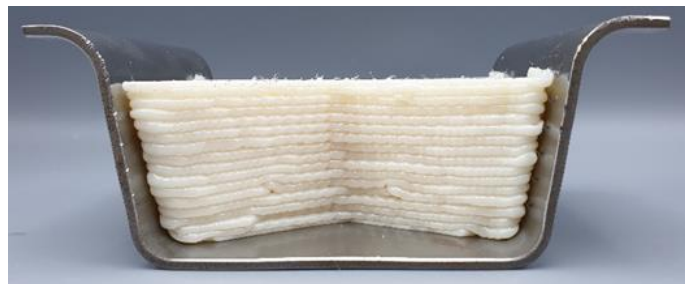
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4-74: Flexible Prozesskette angewendet auf Erlanger Träger Teilabschnitt mit (a) Strukturiertem Metallprofil vor dem 3D-Druck, (b) Kunststoffverrippung im Metallprofil nach dem 3D-Druck sowie (c) und (d) zerspannte Kunststoffverrippung im Metallprofil ©IWF

Betrachtung der Prozesskette am Beispiel eines Rahmens für eine Kniegelenksprothese

Die bei der Fa. Ottobock gefertigte Kniegelenksprothese wird zu großen Teilen in Handarbeit gefertigt und besteht aus einem duroplastischen Kohlefaserrahmen in Monocoque-Bauweise, einer hydraulischen Dämpfungseinheit mit Prozessor und Steuereinheit, einem Lithium-Ionen-Akkumulator, Kniewinkelsensor, Einheit zur Geschwindigkeitsmessung, Bluetooth®-Schnittstelle sowie kleinen in den Rahmen eingearbeiteten Titan-Metalleinlegern (siehe Abbildung 4-75). Die Metalleinleger dienen dabei der Anbindung der Prothese an die Dämpfungseinheit sowie die Unterschenkel- und Fußprothetik. Die in die Kniegelenksprothese integrierte Messtechnik führt 50-Mal in der Sekunde eine Messung der Bewegungsgeschwindigkeit durch. Der eingebaute Mikroprozessor regelt daraufhin die Dämpfung des Gelenks und ermöglicht so ein natürliches Bewegungsgefühl in Echtzeit. Die Kniegelenksprothese hat dabei ein maximales Gewicht von 1240 g.



Abbildung 4-75: Kniegelenksprothese C-Leg der Fa. Ottobock [Ott21]

Durch die Flexibilität der neu entwickelte Prozesskette ergeben sich bei der Fertigung einer Prothese neue Freiheiten für die Konstruktion. So können beispielsweise lasttragende Bereiche über eine Topologieoptimierung definiert und durch den Einsatz von Leichtmetall substituiert werden. Infolgedessen ergeben sich Bereiche, die keine lasttragenden Eigenschaften haben und lediglich als Sichtteile fungieren. Diese können aus einem Kunststoff mittlerer Festigkeit gefertigt werden. Die Verbindung zwischen den lasttragenden und lastfreien Komponenten kann klebstofffrei mittels der in Kapitel 4.2 entwickelten Verklammerungsstrukturen hergestellt werden.

Aufteilung der Prothesengeometrie in lasttragende Bereiche und Sichtflächen

Mit dem Ziel einen Prothesenrahmen gleicher Geometrie mit vergleichsweise ähnlichem Gewicht unter Verwendung der robotergestützten Prozesskette zu erhalten, wurde der Kohlefaserrahmen, aufbauend auf den zuvor aufgeführten Konstruktionsansätzen durch eine Metall-Kunststoff-Kombination substituiert. Während die metallische Komponente dabei die lasttragende Struktur darstellt, übernimmt die Kunststoffkomponente die Aufgaben eines Gehäuses mit natürlicher Ästhetik. Für die Konstruktion der Metall-Kunststoff-Prothese wurde die durch die Fa. Ottobock zur Verfügung gestellte CAD-Datei entsprechend überarbeitet. Nach einer Analyse hinsichtlich der Kraftverläufe innerhalb der Prothese wurden zwei mögliche Metallrahmen identifiziert. Diese sind in Abbildung 4-76 zu erkennen. Bei beiden Konzepten laufen die Lastpfade ununterbrochen zwischen den Kraftein- und -ausleitungspunkten. Der Unterschied der Konzepte besteht in einem zusätzlichen Steg zwischen den beiden seitlichen Me-

tallauslegern. Dieser führt zu einer höheren Torsionssteifigkeit resultiert aber in einem höheren Gesamtgewicht. Da die Prothese zentral über eine Dämpfungseinheit verfügt, die eine zusätzliche Steifigkeit hervorruft, wurde Rahmenkonzept 2 weiterverfolgt und wie in Abbildung 4-76c für erste Machbarkeitsuntersuchungen gefertigt. Die Metallkomponente besteht aus Gründen der einfacheren Fertigung aus zwei Auslegern sowie einem Metallring, der mit den beiden Auslegern über einen 2-K-Strukturklebstoff gefügt wurde. Auf Basis der Konstruktionsdaten ergibt sich bei Einsatz einer Metallkomponente aus Titan und einer ABS-Kunststoffkomponente ein Gewicht von 676 g für den Metall-Kunststoff-Rahmen der Kniegelenksprothese ohne eingebautes Dämpfungssystem bzw. Sensorik. Für die ersten Machbarkeitsuntersuchungen kam zunächst 3.4365 (7075-Aluminium) für die Ausleger und 1.0503 Stahl für den Ring zum Einsatz. Es ergibt sich somit ein theoretisches Gesamtgewicht von 564 g für den Metall-Kunststoff-Rahmen. Die im Vergleich mit der ursprünglichen Prothesengeometrie verbleibenden Bereiche werden über den additiven Kunststoffauftrag als ästhetische Sichtflächen aufgebracht (siehe Abbildung 4-76d).

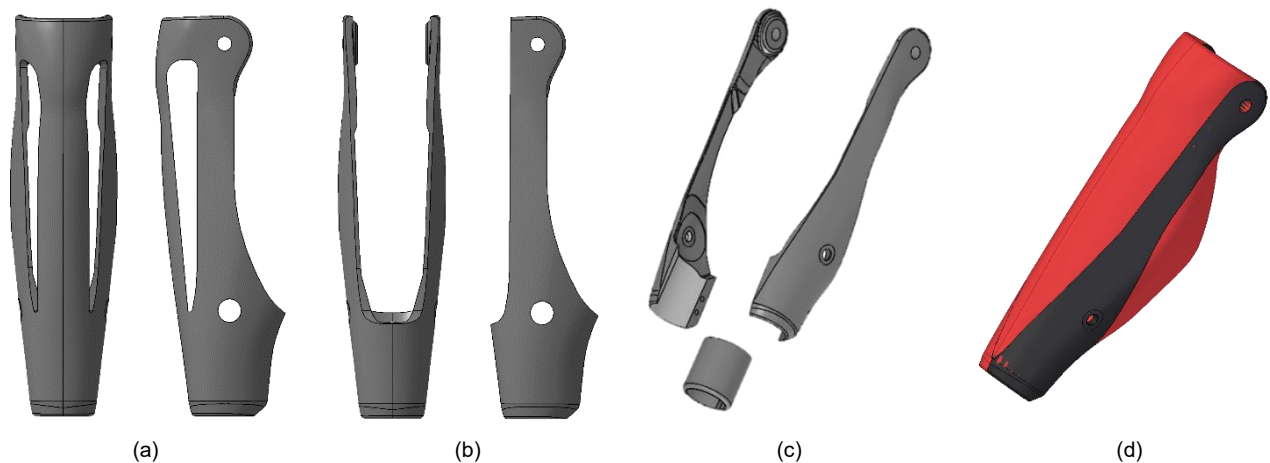


Abbildung 4-76: Rahmenkonzepte für die Prothesenfertigung mit (a) Rahmenkonzept 1, (b) Rahmenkonzept 2, (c) der final gefertigten Konstruktion von Rahmenkonzept 2 sowie (d) der aufgeteilten Monocoque-Rahmengestaltung in eine Metall-Kunststoff-Geometrie

Stützwerkzeug und Spannvorrichtungen

Infolge der hohen Krafteinwirkung während des Strukturierens und um eine Stützfläche für den 3D-Druck abzubilden, wurde auf Basis der Formwerkzeuggeometrie der Fa. Ottobock ein eigenes Stützwerkzeug abgeleitet. Ähnlich dem Formwerkzeug von Fa. Ottobock muss sich dieses nach dem Prozess von dem gefertigten Rahmen entformen lassen. Infolge der geometrisch bedingten Hinterschnitte besteht das Stützwerkzeug deshalb aus einem Mittelstück, einer linken und rechten Werkzeughälfte sowie je zwei Passfedern zur Zentrierung der Werkzeugkomponenten. Die mittlere Werkzeugkomponente des Stützwerkzeuges ist mit einem konischen Verlauf in Dickenrichtung konstruiert und ermöglicht so eine zerstörungsfreie Entformung der hergestellten Kniegelenksprothese.

Für die Oberflächenstrukturierung und die Zerspannung wird das Stützwerkzeug horizontal mit vier Winkeln am Bearbeitungsbereich verspannt. Dies ermöglicht eine hohe Steifigkeit der Spannvorrichtung, die aufgrund der hohen Prozesskräfte erforderlich ist. Die Winkelkonstruktionen ermöglichen zusätzlich eine horizontal um 180° gedrehte Einspannung des Stützwerkzeuges, sodass eine kollisionsfreie Erreichbarkeit der kompletten Geometrie gegeben ist (siehe Abbildung 4-77).

Für den 3D-Druckprozess wurde eine weitere Spannvorrichtung entwickelt und gefertigt. Diese ermöglicht eine vertikale Einspannung des Stützwerkzeuges auf der Bearbeitungsplattform. Sofern die eingesetzte Fertigungszelle über einen rotationssymmetrischen dreh- und schwenkbaren Bearbeitungsbereich verfügt, ergibt sich so die Möglichkeit eines Schwenkens der Arbeitsfläche um 90° und einer anschließenden Rotation der Arbeitsfläche bzw. des Stützwerkzeuges in Abhängigkeit der Bahnplanung. Durch diesen Aufbau kann die für den Kunststoffauftrag vorteilhafte 90° -Ausrichtung des Extruders genutzt werden. Die Spannvorrichtung für den additiven Kunststoffauftrag ist in Abbildung 4-78 dargestellt.

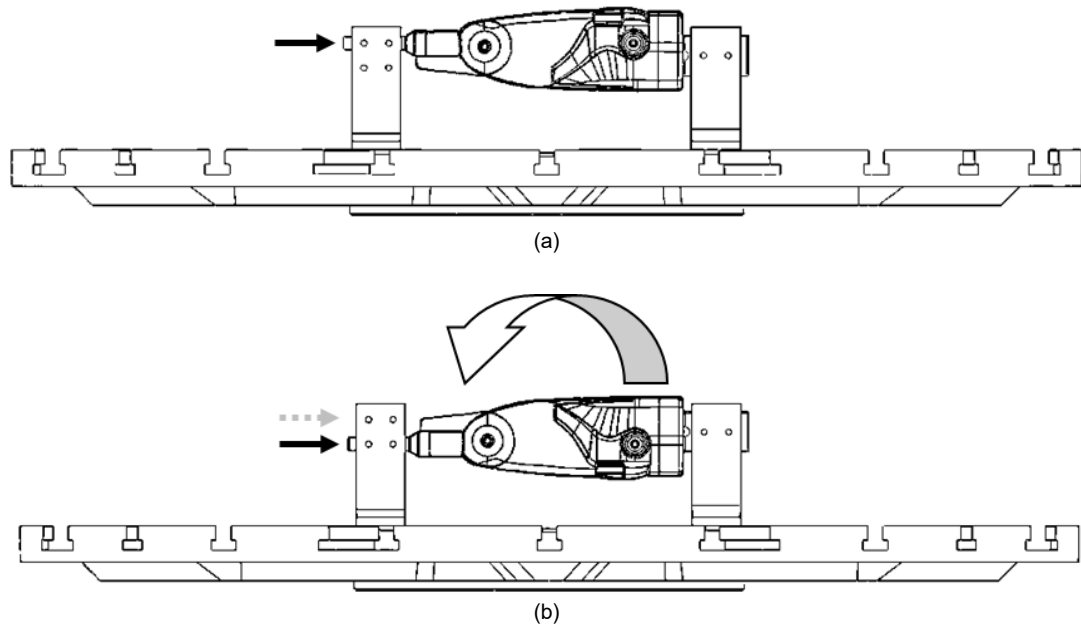


Abbildung 4-77: Spannvorrichtung für die Oberflächenstrukturierung und Zerspanung mit (a) Einspannposition 1 und (b) um 180° gedrehte Einspannposition 2 ©IWF

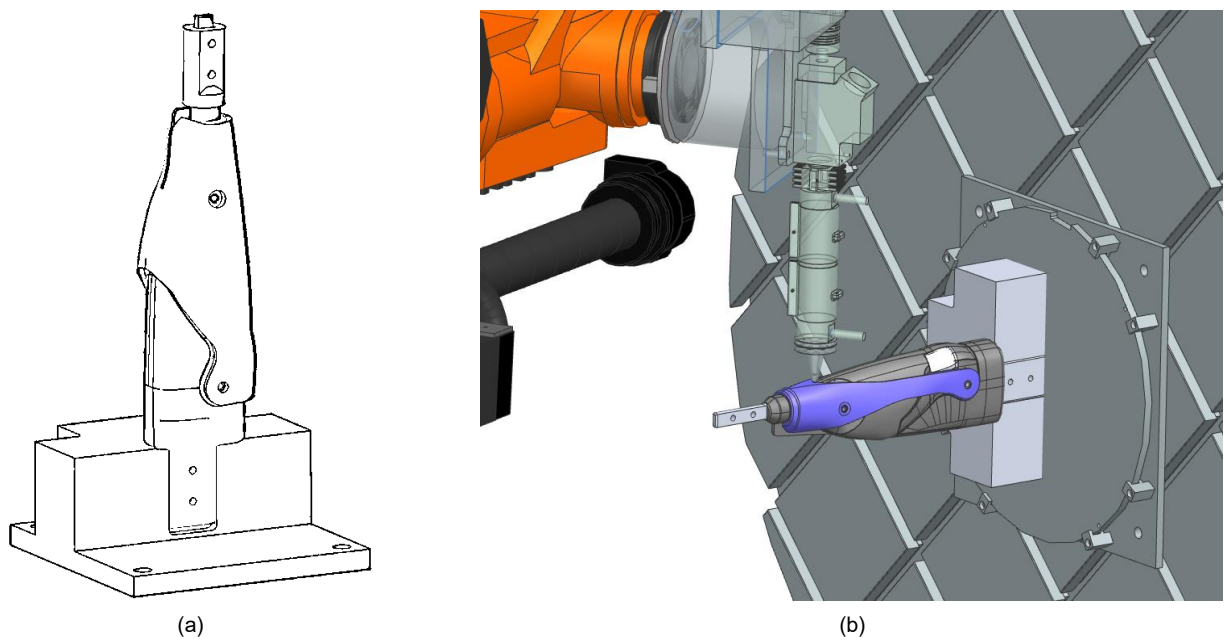
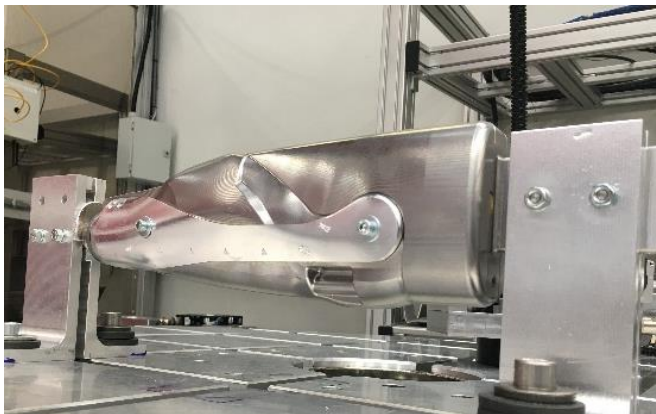


Abbildung 4-78: Spannvorrichtung für den Kunststoffauftrag mit (a) Spannvorrichtung und (b) um 90° gedrehte Druckposition ©IWF

Oberflächenstrukturierung der Metallkomponente

Im Rahmen des Verbundprojektes wurde damit begonnen die Prozesskette experimentell am Beispiel der Kniegelenksprothese aufzuzeigen. Hierbei wurden in ersten Machbarkeitsuntersuchungen erfolgreich Verklammerungsstrukturen mittels robotergestütztem Werkzeug in den Metallrahmen eingebracht. Der Metallrahmen wurde dabei mit dem Stützwerkzeug verschraubt und dieses in der Spannvorrichtung mittels Passschrauben fixiert. Die Nutzung von Passschrauben hat den Vorteil eine axiale Verschiebung des Stützwerkzeuges zwischen den Spannwickeln infolge des Strukturierungsprozess zu vermeiden. Es wurden zunächst sechs Verklammerungsstrukturen je Seite eingebracht. In Abbildung 4-79 sind die Ergebnisse der eingebrachten Verklammerungsstrukturen dargestellt. Die Herausforderung des Strukturierungsprozesses liegt in der Bearbeitung von Freiformflächen. Insbesondere mehrfach gekrümmte Oberflächen erfordern eine speziell angepasste Bahnplanung. Während die Strukturierung ebener Flächen einen Werkzeugeingriffswinkel von 20° benötigt und dieser bei einfach gekrümmten Oberflächen über die Tangente am Werkzeugeingriffspunkt übertragbar ist, erfordern mehrfach gekrümmte Oberflächen (konvex/ konkav) veränderte Werkzeugeingriffswinkel. Je nach Krümmungsradius ist dabei ein Winkel größer 20° oder kleiner 20° notwendig. Für die Machbarkeitsuntersuchungen am Metallrahmen wurden diese Winkel zunächst iterativ bestimmt.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4-79: Strukturierte Oberfläche des Metallrahmens: (a) Darstellung der aufgespannten Prothese; (b) Detailansicht der Strukturierung - seitlich; c) Detailansicht der Strukturierung - hinten ©IWF

Fazit zur Anwendung der flexiblen Prozesskette für Multi-Material-Bauteile

Innerhalb des Verbundprojekts wurde mit Hilfe der neu entwickelten Prozesskette, neben der experimentellen Herstellung eines Erlanger Trägerabschnitts, auch die Fertigung einer prototypischen Version eines Kniegelenksrahmens theoretisch dargestellt und erste Prozessschritte im Rahmen von Machbarkeitsuntersuchungen praktisch umgesetzt. Die flexible Prozesskette zeigt dabei, insbesondere am Beispiel der Kniegelenksprothese, dass unter Anwendung einer Topologieoptimierung neue konstruktive Lösungen für die Fertigung von Metall-Kunststoff-Bauteilen möglich sind. Hinzukommend zeigen die erzielten Ergebnisse der roboterassistierten Einbringung von Verklammerungsstrukturen eine automatisierbare und ressourcenschonende Füge-technik für individualisierbare Metall-Kunststoff-Bauteile auf. Insgesamt konnten durch die durchgeführten experimentellen Untersuchungen die nachfolgend aufgeführten zu beachtenden Punkte identifiziert werden:

- Der Strukturierungsprozess bedarf einer Spannvorrichtung hoher Steifigkeit für wiederholgenaue Positionierung und präzise Einbringung der Verklammerungsstrukturen.
- Es ist auf eine gute Zugänglichkeit des Werkzeugs im Strukturierungsprozess zu achten (Werkzeugeingriffswinkel im Bereich von 20°).
- Für den Kunststoffauftrag auf Verklammerungsstrukturen ist der Materialschwund beim Erkalten zu berücksichtigen.
- Es sollten nach Möglichkeit beheizbare Spannvorrichtungen vorgesehen werden, um eine verbesserte Fließfähigkeit des Kunststoffs in die Verklammerungsstrukturen zu gewährleisten.

Die geleisteten Arbeiten bilden die Grundlage für die weiteren Untersuchungsfelder und Entwicklungsarbeiten im Bereich der roboterbasierten Fertigung von Metall-Kunststoff-Bauteilen.

5 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der erzielten Forschungsergebnisse

5.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU

Die Fa. 3D-Schilling ist ein Anbieter im Bereich von Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing und bietet sowohl Dienstleistungen als auch speziell konzipierte Anlagen für die Industrie an. Insgesamt brachte das Projekt der Fa. 3D-Schilling einen Wissensgewinn im Bereich der Automatisierung, woraus ein neuer Geschäftsbereich „Automatisierungstechnik“ gegründet wurde. Die neuen Erkenntnisse und das erworbene Wissen werden bei 3D-Schilling in Dienstleistungen und kundenspezifische Anlagen umgesetzt und so eine Umsatzsteigerung von 10 % bis 15 % erwartet.

Die Fa. robot-machining GmbH profitiert in mehreren Aspekten vom Forschungsprojekt. Durch die Integration einer lokalen Absaugung in Spindelnähe können zukünftig großspanende und „staubige“ Werkstoffe mit geringerer Verschmutzung des Bearbeitungszentrums bearbeitet werden. Dadurch werden höhere Standzeiten der Komponenten erreicht, die zu einem Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Anbietern von roboterbasierten Anlagen führt. Außerdem reduziert sich der Reinigungsaufwand der Anlage nach einem durchgeführten Fräsprozess, wodurch in Zukunft eine höhere Anlagenproduktivität erreicht werden kann.

Die Robotized RM Systems GmbH war im Rahmen des Forschungsprojektes für die softwareseitige Umsetzung der Ziele dieses Projektes zuständig. Durch die Entwicklung eines Bahnplaners für die Oberflächenstrukturierung von Freiformgeometrien und die Weiterentwicklung eines vorhandenen Moduls für die Bahnplanung additiver Prozesse wurden neue Anwendungsfelder für die hausinterne Software „Robotmaster“ erschlossen. Die selbstentwickelte Kollisionsüberwachung für die Absaughaube stellt darüber hinaus nun ein Alleinstellungsmerkmal der Software dar, sodass Anwender bei der Bahnplanung mit der im Projekt entwickelten In-Prozess-Spanabsaugung auf diese zurückgreifen können. Es wird erwartet, dass die Nachfrage nach diesen Lösungen zukünftig zusätzliche Arbeitsplätze sichern wird.

Darüber hinaus hatte das Verbundprojekt auch für das IWF einen erheblichen Nutzen. Es wurde sowohl neues Wissen im Bereich der inkrementellen Fertigung auf hauseigener Infrastruktur generiert, als auch neue Technologieträger entwickelt und aufgebaut. Hierzu zählen der Endeffektor FauST für die Oberflächenstrukturierung von Freiformgeometrien, sowie die adaptive In-Prozess-Spanerfassung mit integrierter Prozessregelung. Daraus ergeben sich auch für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen neue Möglichkeiten sowie verbesserte Arbeitsumgebungen (Span- und Stauberfassung). Infolge der umfangreichen Untersuchungen zum robotergestützten 3D-Druck ergaben sich neue wissenschaftliche Fragestellungen, die bereits in weiteren Forschungsanträgen und Projektideen münden. Von Interesse sind dabei unter anderem der Anstellwinkel der Extruderdüse während des 3D-Druckprozesses sowie die Erweiterung der Prozesslandkarte für den additiven Andruck mit zusätzlichen Materialien. Insbesondere das Thema der Nachhaltigkeit durch den Einsatz von rezyklierten oder biobasierten Kunststoffen wird dabei eine Rolle spielen. Über die gesamte Projektlaufzeit wurden 15 studentische Arbeiten durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

5.2 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Mit dem Verbundprojekt HyLight3D wurde ein aktuell zunehmend wichtigeres Thema bearbeitet: Die kostengünstige Herstellung individueller Metall-Kunststoff-Bauteile. Hierfür wurde eine industriell skalierbare Prozesskette auf eine flexible roboterbasierte Anlagentechnik angewendet und neuentwickelte Technologieträger eingesetzt. Mit Hilfe der im Forschungsprojekt betrachteten Technologie werden insbesondere dem additiven Kunststoffauftrag im industriellen Bereich neue Perspektiven eröffnet. Gezeigt wurde dies an der Fertigung eines Erlanger Träger Teilabschnitts und der Betrachtung einer Kniegelenksprothese der Firma Ottobock.

Insbesondere die Möglichkeit einer roboterbasierten Oberflächenstrukturierung von Freiformflächen, stellt eine Alternative auf dem Gebiet der klebstofffreien Fügetechnik für Metall-Kunststoff-Verbunde dar. Aufwendige Oberflächenvorbereitungen sowie zeitintensive Trocknungszeiten können so substituiert werden.

Darüber hinaus stellt die entwickelte Absaughaube, die während des Prozesses Kollisionen vermeidet, eine weitere innovative Lösung dar. Eine In-Prozess-Spannerfassung verringert die Fertigungsnebenzeiten durch das Reinigen der Anlage nach der Bauteilbearbeitung und erhöht so die Produktivität von Zerspanprozessen. Außerdem wird durch die Absaugung der Späne am Entstehungsort die Emission von Stäuben und lungengängigen Partikeln signifikant reduziert und so die Arbeitssicherheit erhöht.

5.3 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden komplexe Technologieträger für die Fertigung von Metall-Kunststoff-Bauteilen mit Hilfe einer flexiblen, industriell skalierbaren Prozesskette entwickelt. Neben einem Endeffektor für die Strukturierung von Metalloberflächen und der Weiterentwicklung bestehender Extrudertechnik, wurde eine In-Prozess-Spannerfassung entwickelt und validiert. Weiterhin wurden Prozessparameter für den Andruckprozess von ABS auf Metallstrukturen charakterisiert und zur Bewertung der Verbindungsgüte Scher-Zug-Versuche in Anlehnung an DIN 1465 durchgeführt. Dabei konnten Scherzugfestigkeiten von maximal 246 N pro Einzelstruktur erzielt werden. Darüber hinaus wurde eine Regelung etabliert, die kritische Zerspanparameter während der Materialbearbeitung anpasst. Durch die Entwicklung eines Bahnplanungstools für die Oberflächenstrukturierung und die Bewegung der adaptiven Absaughaube, können die entwickelten Technologieträger vollständig automatisiert eingesetzt werden. Basierend auf der entwickelten prototypischen Roboterzelle für die Fertigung von Metall-Kunststoff-Bauteilen existiert zudem ein industriefähiges Anlagenkonzept. Durch den abschließend gefertigten Demonstrator (Erlanger Träger Teilabschnitt) wurde die neuartige Prozesskette erfolgreich zur Fertigung eines Metall-Kunststoff-Bauteils eingesetzt und zeigt durch die klebstofffreie Fügetechnik sowie die Fertigung ohne formgebundene Werkzeuge das Potenzial der Prozesskette zur Herstellung variantenreicher Metall-Kunststoff-Bauteile auf. Darüber hinaus zeigt die Anwendung der Prozesskette auf die Kniegelenksprothese bereits konkret mögliche Anwendungsszenarien auf. In Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse in Bezug auf die Teilziele des Verbundprojektes abschließend zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Ergebnisse in Bezug auf benannte Teilziele

Nr.	Teilziel	Ergebnisse
1	Endeffektors zur robotergestützten Oberflächenstrukturierung von Freiformflächen	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Inbetriebnahme des Strukturierungswerkzeugs „FauST“ • Charakterisierung erzeugbarer Verklammerungsstrukturen • Entwicklung eines CAM-Moduls zur Bahnplanung
2	Charakterisierung des additiven Kunststoffauftrags auf Oberflächenstrukturen	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung bestehende Extrudertechnik • Evaluation von Andruck- und Aufheizmethoden • Identifikation eines Prozessfensters für den additiven Kunststoffauftrag auf Verklammerungsstrukturen • Entwicklung eines Softwaremoduls für den extruderbasierten 3D-Druck
3	Absaugsystems mit In-Prozess-Spannerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Validierung einer In-Prozess-Spannerfassung • Umsetzung einer softwareseitigen Kollisionsüberwachung für das Absaugsystem • Aufbau und Validierung einer Prozessregelung für die Zerspanung von Metall-Kunststoff-Bauteilen
4	Validierung der Prozesskette an Demonstratoren	<ul style="list-style-type: none"> • Erfolgreiche Umsetzung eines Erlanger Träger – Teilabschnitts mit Hilfe der neuen Prozesskette • Theoretische Machbarkeit am Beispiel einer Kniegelenksprothese aufgezeigt • Erfolgreiche Einbringung von Verklammerungsstrukturen in prototypischen Metallrahmen (Teil der Kniegelenksprothese)

6 Literaturverzeichnis

Abkürzung	Quelle ausgeschrieben
[Arb00]	Arbesman, R.; Brake plate and method and apparatus for manufacturing same; WO2000049308A1, 24.08.2000
[Aya20]	Ayari, O.; Bounali, A.; Méausoone, P.-J.: "Cutting forces and accuracy characterization during wood machining with serial robots", In: European Journal of Wood and Wood Products (2020) 78:767–775, Springer-Verlag GmbH Germany 2020; https://doi.org/10.1007/s00107-020-01539-4
[Bla16]	Black, S.; Structural adhesives, Part II: Aerospace, In: Composite World, 2016
[Ble04]	Blecken, J.; Optimierung der Staub- und Späneerfassung in stationären Holzbearbeitungsmaschinen; Dissertation der Technischen Universität Braunschweig; 2004
[Bra16]	Brand, M.; Kühn, M.; Müller, A.; Klaus, K.; Enhancing the tensile strength in hybrid Metal-FRP-Materials through various interlocking structure patterns In: EURO HYBRID - Materials and Structures 2016, Kaiserslautern, Germany, page 251, 2016
[Cat14]	Catlin, M. R.; System and method for forming a vehicle trim component via additive manufacturing, and vehicle trim component; WO2014193961A1, 04.12.2014
[Che18]	Chen, Y.H.; Dong, F.H.; Robot machining: recent development and future research issues. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. 66 (9-12): p. 1489-1497
[Che18a]	Chen C.; Peng; F., Yan, R.; Fan, Z.; Li, Y.; Wie, D.; Posture-dependent stability prediction of a milling industrial robot based on inverse distance weighted method; in 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USA; Procedia Manufacturing 17 (2018) 993–100
[Chi12]	Chimani, C. M.; Leichtmetallentwicklungen für hybride Leichtbaulösungen; AIT Austrian Institut of Technologie. LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH, Fill-Academy, Gurten, 2012
[Dra17]	Draxler, M.; Lidauer, C.; Greiner Perfoam GmbH; Verfahren und Verwendung eines 3d-Druckers zur Herstellung eines KFZ-Innenausstattungsbauteils sowie dadurch hergestelltes KFZ-Innenausstattungsbauteil; WO2017093261A1, 08.06.2017
[Dre07]	Dressler, M.; Simulation von Späneerfassungsvorgängen in Absaughauben bei holzbearbeitenden Maschinen; Dissertation der Universität Stuttgart; 2007
[Drö16]	Dröder, K.; Brand, M.; Gebken, T.; Kühn, M.; Increasing the interlocking effect between metal and FRP by mechanical undercuts, in: Int. J. Automotive Composites, 2016
[Drö17a]	Dröder, K.; Brand, M.; Kühn, M.; Numerical and Experimental Analyses on the Influence of Array Patterns in Hybrid Metal-FRP Materials Interlocked by Mechanical Undercuts, auf: 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2017
[Drö17b]	Dröder, K.; Gerbers, R.; Reichler, A.; Bobka, P.; Müller, A., and Dietrich, F. Incremental Manufacturing: Design Aspects of flexible hybrid Manufacturing Cells for multi-scale Production. 7. WGP-Jahreskongress 2017 (2017), 637–647.
[Drö17c]	Dröder, K.; Brand, M.; Meiners, D.; Müller, S.: Mechanische Strukturierung für hochfeste Metall-Kunststoff-Hybride – HyTensile. Ergebnisse eines Vorhabens der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) gefördert über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, ISBN 9783867765060, 2017.
[ELE10]	Atzeni, E.; Iuliano, L.; Minetola, P.; Salmi, A.; Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts; in Rapid Prototyping Journal, Vol. 16 Issue: 5, pp.308-317, 2010
[Fil11]	Filho STA, Bueno C, Sabtos JF, Huber N, Hage E. On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber reinforced polymer composite hybrid structures. Mater Sci Eng A 2011;528. 384-48.
[Fil17]	Amancio-Filho, S.; Blaga, L.-A.; Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures: Principles and Applications, John Wiley & Sons, 2017, ISBN 9781119429562
[Fin10]	Fink, A.; Camanho, P.P.; Andres, J.M.; Pfeiffer, E.; Obst, A.: Hybrid CFRP/titanium bolted joints: performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor. Compos Sci Technol 2010;70:305–17.
[Fuß95]	Fuß, M.; Fräsen von Holz und Holzwerkstoffen – Verbesserung von Zerspanleistung und Wirtschaftlichkeit; Dissertation der Technischen Universität Braunschweig; 1995
[Geb15]	Gebhard, A.; Matei, D. I.; Schulte-Südhoff, A.; Schuko Heinz Schulte-Suedhoff & Co KG GmbH, Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung; Absaugvorrichtung, Werkzeugmaschine und Absaugverfahren; DE102013020820A1, 18.06.2015
[Geb17]	Gebhard, A.; Absaugtechnik beim Zerspanen von Leichtbauwerkstoffen; URL: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Leichtbautechnologien/Produktblatt_Absaugung_de.pdf ; [Stand: 30.01.18]
[Gra10]	Gradinger, R.; Ucsnik, S.; FEM-basierte Untersuchungen einer innovativen Metall-FVK Füge-technik. AIT Austrian Institut of Technologie. LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH. Hybridica Forum, 2010
[Hei20]	Heinz, C.; Lammert, N.; Stier, T.; Unger, N.: Additive manufacturing based on screw extrusion – Applications, machines and materials in the automotive industry. PIAE, Mannheim 2020
[Hig00]	Higgins, A.; Adhesive bonding of aircraft structures, In: International Journal of Adhesion and Adhesives, Elsevier, Vol. 20, Issue 5, 2000, Pages 367-376
[Hoe15]	Hoerlein, R. H.; Koenig, J.; Verfahren zur Herstellung eines Verbundbauteils, 3D-Drucker und Verbundbauteil; DE102013217825A1, 12.03.2015

- [Jan20] Janez, G.; Timi, K.; Karl, G.; Miran, B. :“ Accuracy improvement of robotic machining based on robot's structural properties”, In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020) 108:1309–1329, Springer-Verlag London Ltd. 2020, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05438-z>
- [Kyo16] Kyovtorov, V.; Georgiev, I.; Margenov, S.; Stoychev, D.; Oliveri, F.; Tarchi, D.: New antenna design approach – 3D polymer printing and metallization.experimental test at 14–18 GHz, in: International Journal of Electronics and Communications, Doi: 10.1016/j.aee.2016.12.017, 2016
- [Lam17] Lammert, N.; Additive Fertigung: hybride Fertigung von funktionsintegrierten Kunststoffprodukten; 2017
- [Liu14] Liu, F.C.; Liao, J.; Nakata, K.: Joining of metal to plastic using friction lap welding. In: Materials and Design, Volume 54, pp 236–244.
- [Liu19] Liu, Y.; Li, S.; Li, H.; Qin, X.; Xing, Y.; Liu, H.: „The design and performance evaluation of assisted chip removal system in helical milling of CFRP/Ti stacks”, In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology(2020) 108:1297–1308, Springer-Verlag London Ltd. 2020, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05421-8>
- [Mai15] Maidin, S.; Jaafar, M. H.; „Design and Manufacture of Recurve Bow Riser Using Fused Deposition Modelling and Fibre-Reinforced Composite Material“, In: Applied Mechanics and Materials, Vol. 786, Chapter 4: Applied Mechanics, Design and Manufacturing, S. 300-304, 08/2015
- [Mej16] Mejri, S., et al., Dynamic characterization of machining robot and stability analysis. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 82(1-4): p. 351-359
- [Nei14] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.; Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2. Auflage, ISBN 978-3-446-43696-1, Carl Hanser Verlag, München, 07/2014
- [Nes13] Nestler, D.: Verbundwerkstoffe - Werkstoffverbunde. Status quo und Forschungsansätze, Technische Universität Chemnitz, Habilitationsschrift, 2013
- [Pan06] Pan, Z., et al., Chatter analysis of robotic machining process. Journal of Materials Processing Technology, 2006. 173(3): p. 301-309.
- [Rau09] Rauch, M.; „Pinnen“, was nicht zu schweißen ist Metall mit organischem Material verpinnen. Pressemitteilung Fronius International GmbH, 2009
- [Roe11] Roesner, A.; Scheik, S.; Olowinsky, A.; Gillner, A.; Reissen, U.; Schleser, M.; Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids, In: Elsevier, (Physics Procedia 12. (2011), Pt.2, S. 370–377, 2011
- [Sch07] Schäfer, Timo: Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter, Dissertation, 2007.
- [Sch14] Schneider, M.; Birenbaum, C.; Gebhard, A.; Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung; Absaugvorrichtung sowie Verfahren zum Absaugen eines Partikelstromes; DE102012023328B3, 15.05.2014
- [Sch18] Schneider, M.; Stehle, T.; Möhring, H.; Absaugung von Span- und Staubpartikeln, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 108, 2018
- [Sla20] Slavkovic, N., Zivanovic, S., Kokotovic, B. *et al.* Simulation of compensated tool path through virtual robot machining model. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 374 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02461-9>
- [Tür16] Türk, D.; Kussmaul, R.; Zogg, M.; Klahn, C.; Spierings, A.; Könen, H.; Ermanni, P.; Meboldt, M.; Additive Manufacturing with Composites for Integrated Aircraft Structures, auf: SAMPE 2016
- [Wah11] Wahba M, Kawahito Y, Katayama S. Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate. *J Mater Proc Technol* 2011;211:1166–74.
- [Xtr18] Xtrution: 3D printer, online: <http://www.xtrution.com/3d-printer-extruders/3dprinter-2/> (abgerufen am 11.03.2018)
- [Yiz21] YISUMI Germany; Additive Fertigung – wirtschaftlich gedacht; online: <https://www.yizumi-germany.de/produkte/additive-fertigung/> (besucht 01.06. 2021)
- [Yus15] Yusof F, Miyashita Y, Seo N, Mutoh Y, Moshwan R. Utilising friction spot joining for dissimilar joint between aluminium alloy (A5052) and polyethylene terephthalate. *Sci Tech weld join* 2012;17:544–9.

7 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes sind folgende Veröffentlichungen zur Thematik erschienen:

- Dröder, Klaus; Reichler, Ann-Kathrin; Mahlfeld, Georg; Droß, Marcel; Gerbers, Roman Scalable Process Chain for Flexible Production of Metal-Plastic Lightweight Structures In: 2nd CIRP Conference on Composite Material Parts Manufacturing, 2019, Review: Ja
- Droß, Marcel; Albertgt, Max; David, Martin; Reichler Ann-Kathrin; Hoffmeister, Hans-Werner; Dröder, Klaus: Combined robot-based manufacturing and machining of multi-material components. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, Review: Ja
- M. Albertgt, M. David, M. Droß, A.-K. Reichler, H.-W. Hoffmeister, K. Dröder: Production of individualised multi-material components using a robot-based process chain. In: Special Issue HSM 2021 “16th International Conference on High Speed Machining”; 2021, Review: Ja, Veröffentlichung ausstehend
- WGP-Newsletter 2021, Veröffentlichung ausstehend
- Bündnisversammlung VIPO Product and Prozess Optimization (31.1.2020)
- Patent zu „gesteuerter Extruder für den Direktdruck von Kunststoffteilen“ in Vorbereitung (3D Schilling)

8 Anhang

8.1 Anforderungsanalysen

Tabelle 8-1: Anforderungsanalyse zum oberflächenstrukturierenden Roboterendeffektor

Nr.	F/MF/W	Anforderungen:		Bemerkungen:
1		Rahmenbedin- gungen		
1.1	MF		Maximalgewicht < 300 kg	Maximal tragbare Masse des Bodenroboters
1.2	W		Wunschgewicht << 60 kg (30 kg)	Maximal tragbare Masse des Deckenroboters
1.3	F		Gewährleistung zum sicheren Einsatz an vorhandenen Industrierobotern	Wenn notwendig, ist eine Stoßdämpfung bzw. Kraftentkopplung vorzusehen
2		Funktionale- Anforderungen		
2.1	F		Integration des im AiF-Projekt entwickelten Oberflächenstrukturierungswerkzeugs	Durchmesser 6 mm; Stahl 1.2210 (gehärtet)
2.2	F		Einstellbarkeit der Kraft die zur Strukturierung zur Verfügung steht	Ermöglicht Strukturierung unterschiedlicher Werkstoffe
2.3	F		Kraft zwischen 1000-3000 N	aus Versuchsbeschreibungen HyTensile- Abschlussbericht
2.4	W		Variable Einsetzbarkeit des rotationssymmetrischen Werkzeugs zur Nutzung unverbrauchter Schneidenbereiche nach Werkzeugverschleiß	
2.5	F		Nutzung des Werkzeugs zur Oberflächenstrukturierung in Form von aufgestellten Spanformen	siehe HyTensile-Abschlussbericht
2.6	MF		Anbringung an Deckenroboter von KUKA (KR60-HA 3 / Ceiling)	falls Gewicht zu hoch auch KR300 R2500 (300kg) mögl.
2.7	MF		Beschleunigung des Werkzeugs bei Bearbeitungsschritt während Roboter stationär	oder in linearer Bewegung entlang des Bauteils befindlich
3		Qualitätsanforderungen		
3.1	F		Bearbeitungsvorgang ohne Krafteinleitung in den Roboter --> Ausgleichs-/Schwingmassen vorsehen?	Lagestabilität des Roboterkopfes
3.2	W		möglichst kurze Bauform um konvexe/konkave Geometrien strukturieren zu können	ggf. Ausgleichmassen über Hebel parallel anordnen?
3.3	W		Gewichtsparende Behausung vorsehen z.B. aus CFK	

Tabelle 8-2: Anforderungsliste zur Absaughaube mit in-Prozess Spannerfassung

Nr.	F/MF/W	Anforderungen:		Bemerkungen:
1.0		Rahmenbedingungen		
1.1	F		Entfernung von Spänen und Stäuben aus dem Arbeitsraum	
1.2	F		Maximalgewicht = 300 kg	Maximal tragbare Masse des Roboters (KUKA KR 300)
1.3	W		Wunschgewicht ≤ 10 kg	
1.4	F		Keine Einschränkung der Bewegung des Roboters während der Zerspanung	
1.5	F		Zu zerspanende Werkstoffe: <ul style="list-style-type: none"> - Kunststoff (ABS, PEEK ...) - Aluminium (EN AW-5083) - Stahl (X8CrNiS18-9) - Titan 	
1.6	F		Herzustellende Geometrien: <ul style="list-style-type: none"> - Kantenbearbeitung - Nutenfräsen - Fräsen von Freiformen 	
1.7	MF		Vorrangiges Fertigungsverfahren: <ul style="list-style-type: none"> - Fräsen 	
2.0	F	Funktionale Anforderungen		
2.1	F		Automatischer Werkzeugwechsel muss ermöglicht bleiben	
2.2	W		Heben und Senken der Absaughaube	
2.3	W		Kippbewegung der Absaughaube	
2.4	W		Ansteuerung/ Bewegung der Absaughaube durch Robotersoftware	
3.0		Qualitätsanforderungen		
3.1	F		Keine Beeinflussung der zerspannten Oberfläche durch Kontakt zwischen Absaughaube und Bauteil	

8.2 Ergebnisse der Strukturierung von AlMg3

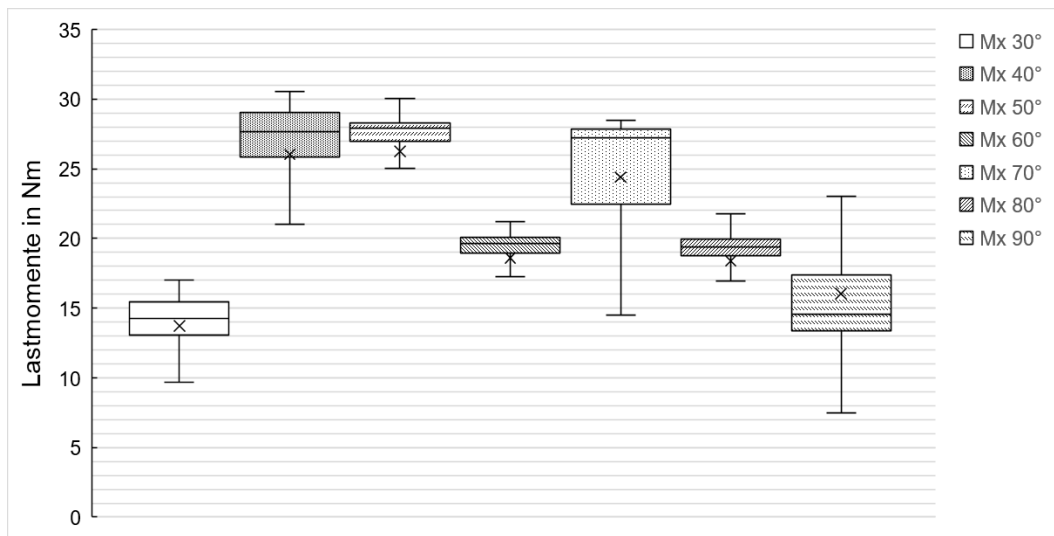


Abbildung 8-1: Gemessene Lastmomente $|M_x|$ für Strukturierungen in AlMg3 unter verschiedenen Winkelerorientierungen des Endeffektors (Strukturierungswinkel konstant bei 20°) ©IWF

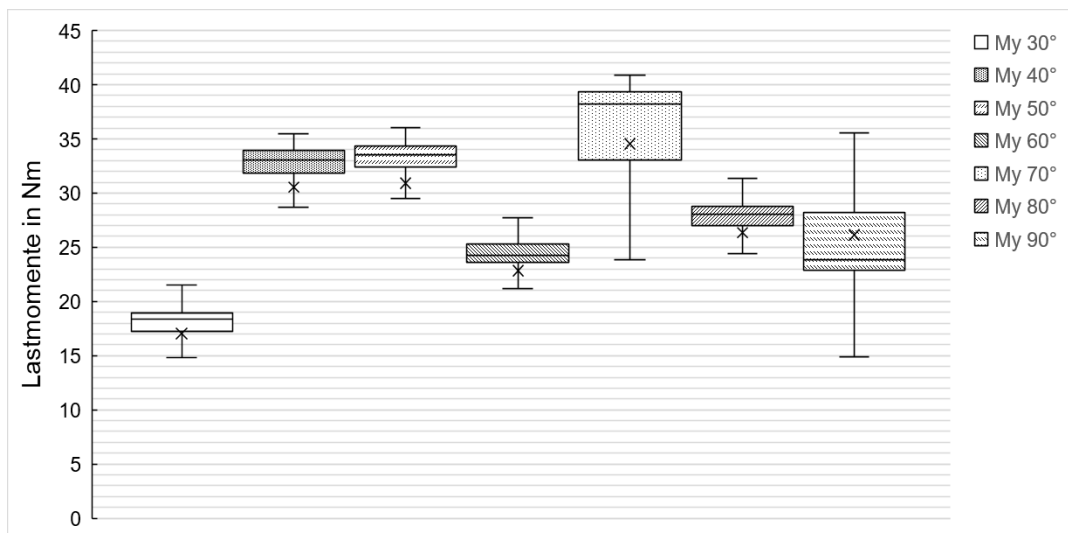


Abbildung 8-2: Gemessene Lastmomente $|M_y|$ für Strukturierungen in AlMg3 unter verschiedenen Winkelerorientierungen des Endeffektors (Strukturierungswinkel konstant bei 20°) ©IWF

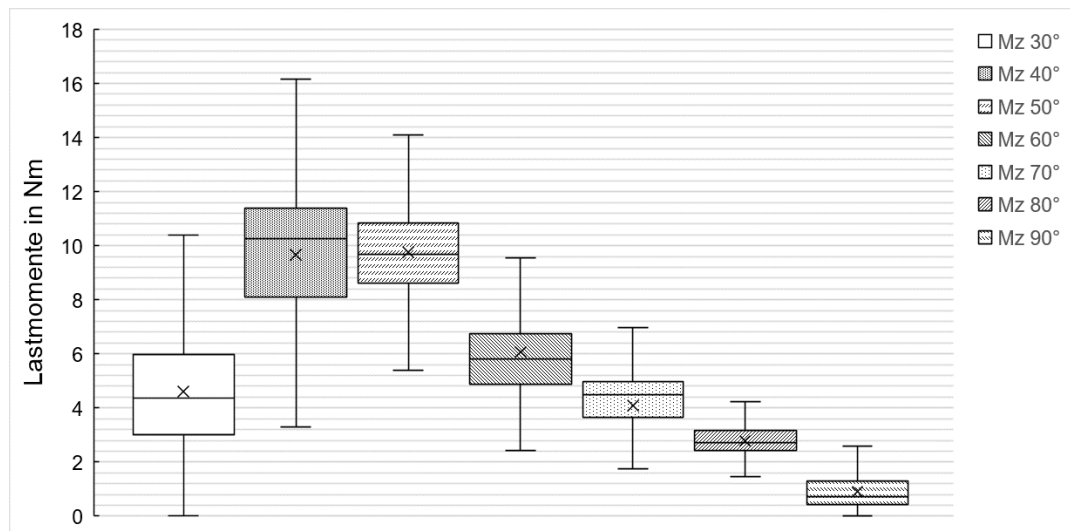


Abbildung 8-3: Gemessene Lastmomente $|M_z|$ für Strukturierungen in AlMg3 unter verschiedenen Winkelerorientierungen des Endeffektors (Strukturierungswinkel konstant bei 20°) ©IWF

8.3 Ergebnisse der Strukturierung von DC 01

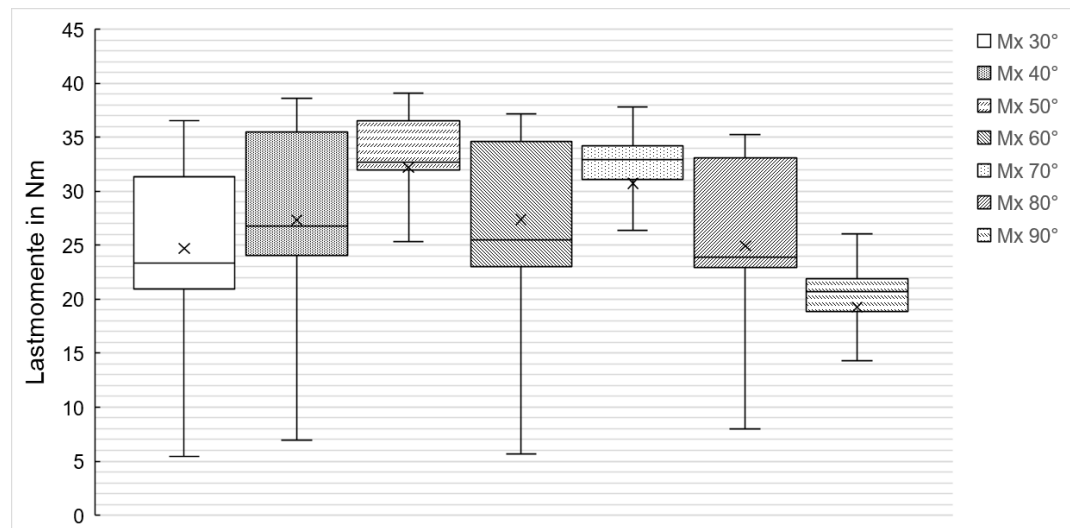


Abbildung 8-4: Gemessene Lastmomente $|M_x|$ für Strukturierungen in DC 01 unter verschiedenen Winkelerorientierungen des Endeffektors (Strukturierungswinkel konstant bei 20°) ©IWF

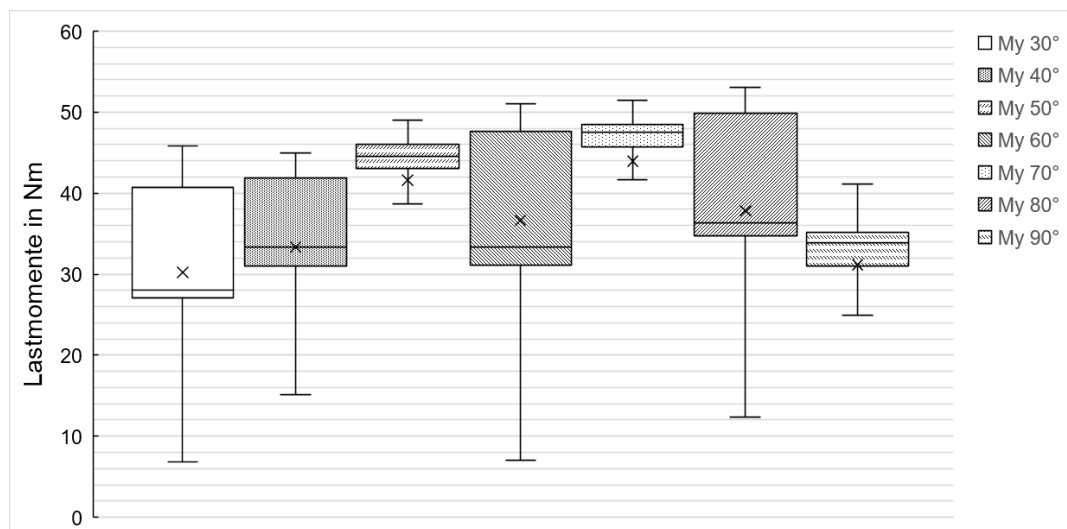


Abbildung 8-5: Gemessene Lastmomente $|M_y|$ für Strukturierungen in DC 01 unter verschiedenen Winkelerorientierungen des Endeffektors (Strukturierungswinkel konstant bei 20°) ©IWF

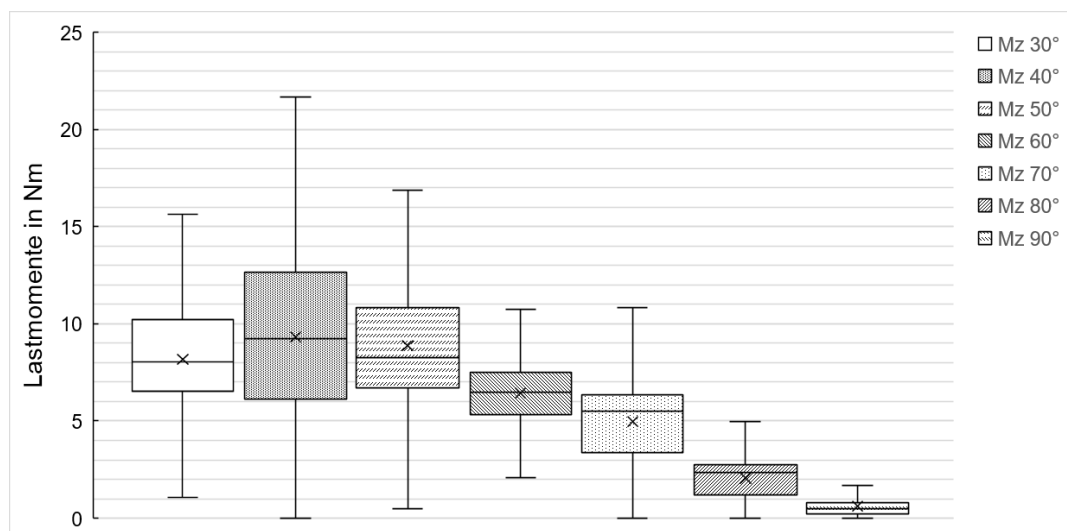


Abbildung 8-6: Gemessene Lastmomente $|M_z|$ für Strukturierungen in DC 01 unter verschiedenen Winkelerorientierungen des Endeffektors (Strukturierungswinkel konstant bei 20°) ©IWF

8.4 Darstellung der Prozessreglung in Labview

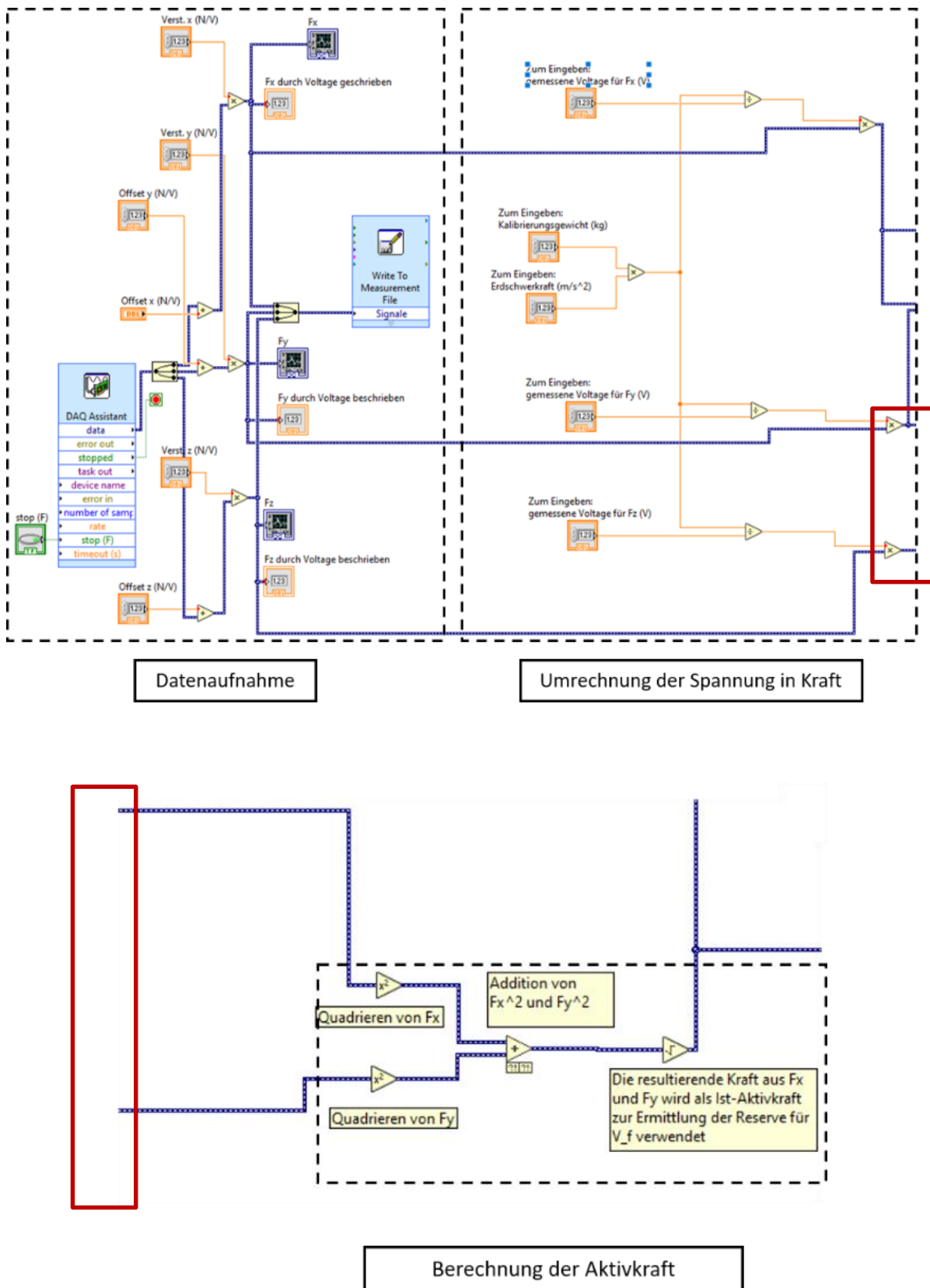


Abbildung 8-7: Regelungsprogramm in LabView (Auszug) ©IWF